

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО**

Факультет інженерно-хімічний

Кафедра хімічного, полімерного та силікатного машинобудування

Рівень вищої освіти другий (магістр)

Спеціальність _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
О. В. Гондляр

«__» _____ 2018 р

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Караулова Вероніка Олексіївна
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Механічні властивості армованих полімерних матеріалів для виготовлення пакування

науковий керівник дисертації Карвацький Антон Янович д.т.н., проф.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «21» 03 2018 р. № 979-с

2. Строк подання студентом дисертації 24.04.18

3. Об'єкт дослідження: механічні властивості пакувальних полімерних матеріалів, армованих природними волокнами

4. Предмет дослідження: залежності ефективних значень механічних властивостей композитних полімерів від зміни матеріалів матриці й волокна та його об'ємного вмісту

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: 1) Проаналізувати сучасний стан питання розробки та дослідження механічних властивостей пакувальних полімерних матеріалів, армованих природними волокнами. 2) Сформулювати математичні моделі задач напружено-деформованого стану (НДС) під час випробування зразків армованих полімерів у наближеннях ізотропного та ортотропного середовищ. 3) Визначити ефективні механічні властивості (модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, границю міцності, жорсткість та ударну в'язкість) композитних полімерних матеріалів для ізотропного та ортотропного наближень у разі односпрямованої орієнтації армувального волокна залежно від матеріалів матриці й волокна та його об'ємного вмісту за аналітичними формулами. 3 використанням границі міцності отримати значення силових навантажень під час розтягу зразків композиційного полімерного матеріалу. 4) Розробити числову методику та програмне забезпечення (ПЗ) для розв'язання задач НДС на базі методу скінченних елементів в наближеннях ізотропного та ортотропного середовищ. Виконати верифікацію розробленого ПЗ – дослідити точність і збіжність числових розв'язків. 5) Виконати числові експерименти НДС зразків армованих полімерів для визначення ефективних механічних властивостей (модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, границю міцності, жорсткість та ударну в'язкість) залежно від матеріалів матриці і волокна та його об'ємного вмісту. Зіставити отримані механічні властивості з відповідними властивостями, розрахованими за аналітичними залежностями. 6) Розробити числову модель полімерної тари та виконати числовий аналіз її міцності для випадку армованого полімеру та порівняти з результатами, отриманими для звичайного полімерного матеріалу. 7) Розробити рекомендації

щодо впровадження армованих полімерів з використанням волокна природного походження в пакувальній індустрії.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: плакати, що включають: загальну характеристику дисертації, математичні моделі НДС композитних полімерів, алгоритми розв'язання задачі, числові моделі НДС, механічні властивості композитних полімерів, армованих волокном природного походження, оцінку похибки розрахунків, рекомендації щодо впровадження в пакувальну галузь армованих полімерів, пакування дрібних виробів, числовий аналіз міцності тари, виготовленої з армованого полімеру, висновки.

7. Орієнтовний перелік публікацій: 2 статті у фаховому виданні України, 3 тези доповідей на всеукраїнських науково-технічних конференціях, 1 патент на корисну модель України.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
розділ 5, заявка на патент	Мікульонюк І.О. проф.	20.01.2017	20.01.2017

9. Дата видачі завдання 15.11.2016

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз літературних і патентних джерел з проблематики дисертації. Формулювання завдань теоретичних досліджень.	31.12.16	виконано
2	Підготовка і подача заявки на патент	21.03.2017	виконано
3	Підготовка розділу 1 дисертації, тез 1 на конференцію	31.03.17	виконано
4	Розробка фізичної та математичної моделей	31.05.17	виконано
5	Підготовка розділу 2 дисертації	31.05.17	виконано
6	Розробка числових моделей НДС	30.09.17	виконано
7	Підготовка розділу 3 дисертації, тез 2 на конференцію	31.11.17	виконано
8	Підготовка стартапу проекту, охорони праці	31.12.17	виконано
9	Числовий аналіз НДС зразків полімерних композитів	31.01.18	виконано
10	Підготовка розділу 4 дисертації, тез на конференцію	28.02.18	виконано
11	Підготовка розділу 5 дисертації, підготовка і подача статті 1	31.03.18	виконано
12	Підготовка розділів 6, 7 дисертації, формулювання висновків, статті 2	20.04.18	виконано

Студент

(підпис)

В.О. Караулова

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

А.Я. Карвацький

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

УДК 621.798.14:539.4-025.25

Магістерська дисертація «Механічні властивості армованих полімерних матеріалів для виготовлення пакування» / В. О. Караулова. КІП ім. Ігоря Сікорського; н.керівник А. Я. Карвацький. Робота містить: 174 с., 31 рис., 36 табл., 3 дод., 58 посилань.

Об'єкт дослідження: механічні властивості пакувальних полімерних матеріалів, армованих природними волокнами.

Предмет дослідження: залежності ефективних значень механічних властивостей композитних полімерів від зміни матеріалів матриці й волокна та його об'ємного вмісту.

Мета роботи полягає у дослідженні ефективних механічних властивостей нових композитних полімерів залежно від матеріалів матриці й армувального волокна природного походження та його об'ємного вмісту в композиті.

Результати роботи та їх новизна. У результаті виконаних у дисертації досліджень вперше отримані такі наукові результати:

- 1) Обґрунтування застосування моделі ортотропного середовища для дослідження напружено-деформованого стану (НДС) зразків полімерних армованих матеріалів.
- 2) Алгоритм визначення ефективних значень механічних характеристик армованих полімерів за допомогою розв'язання задач НДС для композитів з ортотропними властивостями.
- 3) Верифікація числової моделі НДС зразка композитного полімерного матеріалу під час випробування за стандартом ASTM D638 за даними числових експериментів, отриманих за допомогою ANSYS Mechanical APDL. Встановлено, що різниця між результатами розрахунків не перевищує 3,8 %, що є цілком прийнятним для проведення інженерних розрахунків з метою визначення ефективних значень механічних властивостей армованих полімерів.

4) Теоретичні дослідження залежності ефективних значень механічних властивостей (модуля пружності, коефіцієнта Пуассона, границі міцності, жорсткості та ударної в'язкості) композитних полімерів, що піддаються деструкції в природних умовах, від зміни матеріалів матриці й волокна та його об'ємного вмісту.

Практичне значення одержаних результатів полягає у такому:

- 1) На базі методу скінченних елементів розроблено числову методику та програмне забезпечення в середовищі Mathcad для розв'язання задач НДС для випадків ізотропного та ортотропного середовищ.
- 2) За результатами наукових досліджень отримано патент України, що включає спосіб пакування лікарських пігулок, зокрема, з використанням армованих природним волокном полімерів.
- 3) Розроблено рекомендації щодо впровадження в пакувальну індустрію армованих полімерів, що піддаються деструкції в природних умовах.
- 4) Результати дисертаційної роботи заплановано використати в навчальному процесі кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування КПІ ім. Ігоря Сікорського при викладанні дисципліни «Механіка суцільних середовищ» для спеціальності «Прикладна механіка», спеціалізації «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання пакування».

За темою дисертації опубліковано 6 друкованих праць, у тому числі 2 наукові статті у науковому фаховому виданні України, 3 тези доповідей у збірниках доповідей конференцій, 1 патент України на корисну модель.

ПОЛІМЕРНИЙ КОМПОЗИТ, МАТРИЦЯ, ПРИРОДНЕ ВОЛОКНО, МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ, НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН, ПАКОВАННЯ, ТАРА.

ABSTRACT

UDK 621.798.14:539.4-025.25

Master's thesis "Mechanical properties of reinforced polymeric materials for packaging" / V. O. Karaulova. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute; scientific director A. Ya. Karvatskii. The manuscript contains: 174 p., 31 fig., 36 tabl., 3 appendix, 58 reference.

Object of research: mechanical properties of packaging polymeric materials reinforced with natural fibers.

Subject of research: the dependence of the effective values of the mechanical properties of composite polymers on the changes in matrix and fiber materials and its volume content.

The objective of the work is to study the effective mechanical properties of new composite polymers depending on the matrix materials and reinforcing fiber of natural origin and its bulk content in the composite.

The results of the work and their originality. As a result of the research carried out in the dissertation, the following scientific results were obtained for the first time:

- 1) The use of the model of an orthotropic medium for the study of the stress-strain state of samples of polymer reinforced materials is substantiated.
- 2) The algorithm for determining the effective values of the mechanical characteristics of reinforced polymers by solving the problems of stress-strain state for composites with orthotropic properties.
- 3) Verification of the numerical model of the stress-strain state of a sample of a composite polymer material in the ASTM D638 study using data from numerical experiments with ANSYS Mechanical APDL. It is established that the difference between the results of calculations does not exceed 3.8%, which is quite acceptable for carrying out engineering calculations in order to determine the effective values of the mechanical properties of reinforced polymers.
- 4) Theoretical studies of the dependence of the effective values of mechanical properties (modulus of elasticity, Poisson's ratio, tensile strength, tensile toughness and impact

strength) of composite polymers subjected to degradation under natural conditions, from changes in matrix and fiber materials and their volume content.

The practical significance of the results obtained is as follows:

- 1) On the basis of the finite element method, a numerical methodology and software are developed in the Mathcad environment for solving the stress-strain state problems for cases of isotropic and orthotropic media.
- 2) Based on the results of scientific research, a patent of Ukraine has been obtained, which includes a method for packaging medicinal tablets, in particular using natural fiber reinforced polymers.
- 3) Recommendations are developed concerning the introduction of reinforced polymers into the packaging industry, which are subject to destruction under natural conditions.
- 4) The results of the dissertation work are planned to be used in the educational process of the Department of Chemical, Polymer and Silicate Engineering, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute in the presentation of the discipline "Continuum Mechanics" for the specialty "Applied Mechanics", specializations "Engineering, computer modeling and design of packaging equipment".

Six printed works were published on the topic of the thesis, including 2 scientific articles in the scientific professional publication of Ukraine, 3 theses of reports in the conference report collections, and 1 patent of Ukraine for the utility model.

POLYMER COMPOSITE, MATRIX, NATURAL FIBER, MECHANICAL PROPERTIES, NUMERICAL SIMULATION, STRESS-STRAIN STATE, PACKAGING, TARA.

РЕФЕРАТ

УДК 621.798.14:539.4-025.25

Магистерская диссертация «Механические свойства армированных полимерных материалов для изготовления упаковки» / В. А. Караулова. КПИ им. Игоря Сикорского; н.руков. А. Я. Карвацкий. Работа содержит: 174 с., 31 рис., 36 табл., 3 прил., 58 ссылок.

Объект исследования: механические свойства упаковочных полимерных материалов, армированных природными волокнами.

Предмет исследования: зависимости эффективных значений механических свойств композитных полимеров от изменения материалов матрицы и волокна и его объемного содержания.

Цель работы состоит в исследовании эффективных механических свойств новых композитных полимеров в зависимости от материалов матрицы и армирующего волокна природного происхождения и его объемного содержания в композите.

Результаты работы и их новизна. В результате выполненных в диссертации исследований впервые получены следующие научные результаты:

- 1) Обосновано применение модели ортотропной среды для исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) образцов полимерных армированных материалов.
- 2) Алгоритм определения эффективных значений механических характеристик армированных полимеров с помощью решения задач НДС для композитов с ортотропными свойствами.
- 3) Верификация численной модели НДС образца композитного полимерного материала при исследовании по стандарту ASTM D638 по данным численных экспериментов, полученных с помощью ANSYS Mechanical APDL. Установлено, что различие между результатами расчетов не превышает 3,8 %, что является

вполне приемлемым для проведения инженерных расчетов с целью определения эффективных значений механических свойств армированных полимеров.

- 4) Теоретические исследования зависимости эффективных значений механических свойств (модуля упругости, коэффициента Пуассона, предела прочности, жесткости и ударной вязкости) композитных полимеров, подвергающихся деструкции в природных условиях, от изменения материалов матрицы и волокна и его объемного содержания.

Практическое значение полученных результатов состоит в следующем:

- 1) На основе метода конечных элементов разработано численную методику и программное обеспечение в среде Mathcad для решения задач НДС для случаев изотропной и ортотропной сред.
- 2) По результатам научных исследований получен патент Украины, включающий способ упаковки лекарственных таблеток, в частности, с использованием армированных природным волокном полимеров.
- 3) Разработаны рекомендации, касающиеся внедрения в упаковочную индустрию армированных полимеров, которые подвергаются деструкции в природных условиях.
- 4) Результаты диссертационной работы планируется использовать в учебном процессе кафедры химического, полимерного и силикатного машиностроения КПИ им. Игоря Сикорского при изложении дисциплины «Механика сплошных сред» для специальности «Прикладная механика», специализации «Инжиниринг, компьютерное моделирование и проектирование упаковочного оборудования».

По теме диссертации опубликовано 6 печатных трудов, в том числе 2 научные статьи в научном профессиональном издании Украины, 3 тезиса докладов в сборниках докладов конференций, 1 патент Украины на полезную модель.

ПОЛИМЕРНЫЙ КОМПОЗИТ, МАТРИЦА, ПРИРОДНОЕ ВОЛОКНО, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, НАПРУЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ, УПАКОВКА, ТАРА.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	13
ВСТУП	17
1 СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ РОЗРОБКИ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПАКУВАЛЬНИХ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ, АРМОВАНИХ ПРИРОДНИМИ ВОЛОКНАМИ	22
1.1 Класифікація композиційних матеріалів.....	22
1.1.1 Класифікація КМ за матеріалом матриці.....	23
1.1.2 Класифікація КМ за геометрією армувальних елементів...	23
1.1.3 Класифікація КМ за структурою і розташуванням компонентів.....	25
1.1.4 Класифікація матричних КМ за схемою армування.....	25
1.1.5 Класифікація КМ за методами одержання (технологічний принцип)	26
1.1.6 Класифікація КМ за призначенням (експлуатаційний принцип)	26
1.2 Полімерні матриці.....	27
1.2.1 Термопластичні полімери.....	27
1.2.2 Еластомери.....	31
1.3 Наповнювачі композитних полімерів.....	31
1.3.1 Волокнисті наповнювачі.....	32
1.3.2 Листові наповнювачі.....	33
1.3.3 Об'ємні наповнювачі.....	34

					ЛУ61м.019666.01-90ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Механічні властивості армованих полімерних матеріалів для виготовлення пакування			
Розроб.	Каравлова							
Перевір.								
Керівник	Карвацький							
Н. Контр.								
Затверд.	Сівецький				КПІ ім. Ігоря Сікорського			

1.4 Одержання заготовок полімерних композиційних матеріалів.....	34
1.4.1 Одержання препрегів методом просочення арматури смолами.....	35
1.4.2 Одержання препрегів з використанням порошкових дисперсних полімерів.....	35
1.5 Теоретичні основи напружено-деформованого стану полімерних композитів.....	37
1.5.1 Співвідношення напруження – деформація для анізотропних матеріалів.....	37
1.5.2 Жорсткість, піддатливість та інженерні константи для ортотропних матеріалів.....	40
1.5.3 Обмеження для інженерних констант.....	41
1.5.4 Визначення механічних властивостей композитних матеріалів.....	44
1.6 Теоретичне прогнозування механічної поведінки полімерів армованих волокнами природного походження.....	48
Висновки до розділу 1 і завдання досліджень.....	53
2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ АРМОВАНИХ ПОЛІМЕРІВ.....	56
2.1 Постановка задачі для ізотропного середовища.....	56
2.2 Постановка задачі для ортотропного середовища.....	57
2.3 Алгоритми розв’язання задач.....	59
2.4 Методики числового розв’язання задач на базі методу скінченних елементів.....	65
Висновки до розділу 2.....	80
3 ЧИСЛОВІ МОДЕЛІ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ АРМОВАНИХ ПОЛІМЕРІВ.....	81
3.1 Програмне забезпечення та числові моделі.....	81
3.2 Верифікація числових моделей.....	84

Висновки до розділу 3	87
4 ЧИСЛОВИЙ АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ АРМОВАНИХ ПОЛІМЕРІВ	88
4.1 Вибір матеріалів полімерної матриці та природного армувального волокна для розробки нових біо-композитів та визначення їхніх механічних властивостей.....	88
4.2 Оцінка похибки застосування аналітичних співвідношень для визначення ефективних механічних властивостей композитних полімерів...	94
Висновки до розділу 4.....	98
5 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ АРМОВАНИХ ПОЛІМЕРІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ВОЛОКНА ПРИРОДНОГО ПОХОДЖЕННЯ В ПАКУВАЛЬНІЙ ІНДУСТРІЇ	100
5.1 Пакування дрібних виробів.....	100
5.2 Числовий аналіз міцності тари, виготовленої з армованого полімеру.....	101
Висновки до розділу 5.....	105
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ ...	106
7 РОЗРОБКА СТАРТАП–ПРОЕКТУ	118
ВИСНОВКИ.....	127
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	130
Додаток А Текст програмному коду для побудови геометрії в програмі Gmsh.....	136
Додаток Б Механічні властивості композитних полімерів, армованих волокном природного походження.....	139
Додаток В Копії статей, доповідей та тез доповідей.....	149

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

Умовні позначення:

A	– площа поперечного перерізу зразка, м^2 ;
\mathbf{b}	– вектор масових сил, наприклад, гравітаційних, Н/кг ;
$[B^{(e)}]$	– матриця градієнтів СЕ, яка зв’язує деформації й переміщення, м^{-1} ;
$\hat{\mathbf{C}}^4$	– тензор четвертого рангу пружних констант армованого полімеру з ортотропними властивостями, Па ;
C_{ij}	– матриця жорсткості або тензор механічних констант матеріалу, Па ;
C_{ijkl} , $i, j, k, l = 1, 2, 3$	– декартовий тензор четвертого рангу пружних властивостей матеріалу, Па ;
d	– діаметр волокна, мкм ;
D_{ij}	– декартовий тензор другого рангу пружних властивостей матеріалу, який можна записати у матричному вигляді $[D]$, Па ;
$[D^{(e)}]$	– матриця механічних властивостей СЕ, Па ;
E	– модуль пружності, Па ;
E_{comp}	– модуль пружності композитного полімеру з ізотропними властивостями, Па ;
$[f^{(e)}]$	– вектор вільних членів СЕ, Н ;
\mathbf{F}	– вектор зовнішньої сили, Н ;
$\{F\}$	– вектор вільних членів СЛАР;
F_{ult}	– розривне зусилля, Н ;
g_x, g_y, g_z	– компоненти вектора прискорення вільного падіння, м/с^2 ;
G	– модуль зсуву, Па ;
G_C, G_{IS}	– ударна в’язкість, Дж/м^2 ;

$G_x^{(e)} = \rho g_x,$	– компоненти об’ємної сили СЕ, Н/м ³ ;
$G_y^{(e)} = \rho g_y,$	
$G_z^{(e)} = \rho g_z$	
$\hat{\mathbf{I}}$	– одиничний тензор другого рангу;
$[k^{(e)}]$	– матриця жорсткості СЕ, Н/м;
K	– об’ємний модуль, Па;
$[K]$	– глобальна матриця СЛАР;
$l_{кр}$	– критична довжина волокна, мкм, мм;
\mathbf{n}	– вектор зовнішньої нормалі до поверхні тіла;
$[N^{(e)}]$	– матриця функцій форми СЕ;
P	– зовнішній тиск, який задано на поверхні S_p , Па;
$p_x^{(e)}, p_y^{(e)},$	– компоненти поверхневого навантаження СЕ, Н/м ² ;
$p_z^{(e)}$	
$\{P\}$	– вектор-стовпець вузлових сил, Н.
S_{ij}	– матриця піддатливості, Па;
S_F	– площа поверхні, до якої прикладено силове навантаження, м ² ;
S_u	– площа поверхні, на якій задано переміщення, м ² ;
\mathbf{u}	– вектор переміщень, м;
$u_i, i=1,2,3$	– компоненти вектора переміщення, м;
$\{U\}$	– вектор переміщень СЕ, м; вектор невідомих вузлових значень складових переміщень СЛАР, м;
U_T	– жорсткість, Дж/м ³ ;
V	– об’єм робочої зони зразка, м ³ ; об’єм СЕ, м ³ ;
V_f	– об’ємна частка волокна;
V_m	– об’ємна частка матриці;
W	– енергія деформації, Дж/м ³ ;
x, y, z	– декартові координати, м;

β	– коефіцієнт лінійного термічного розширення, K^{-1} ;
$\hat{\varepsilon}$	– симетричний тензор другого рангу пружних деформацій;
$\varepsilon_j, j = \overline{1,6}$	– компоненти тензора деформації в одноіндексному форматі ;
$\{\varepsilon_0^{(e)}\}$	– початкова деформація СЕ, що пов'язана з температурним навантаженням;
$(\varepsilon_c)^T$	– гранично допустима деформація композиту;
$(\varepsilon_f)_{ult}$	– гранично допустима деформація волокна;
$(\varepsilon_m)_{ult}$	– гранично допустима деформація матриці;
ε_{eqM}^{max}	– еквівалентна деформація за Мізесом;
φ_{max}	– об'ємна частка наповнювача;
ν	– коефіцієнт Пуассона;
ν_{comp}	– коефіцієнт Пуассона композитного полімеру з ізотропними властивостями;
θ	– об'ємна деформація;
ρ	– густина, $кг/м^3$;
$\hat{\sigma}$	– симетричний тензор напруження другого рангу, Па;
$\sigma_i, i = \overline{1,6}$	– компоненти тензора напруження в одноіндексному форматі, Па;
$(\sigma_c)^T$	– міцність на розрив композиту, Па;
σ_{ult}	– міцність на розрив, Па;
$[\sigma_{TS}]_{comp}$	– границя міцності композиту, Па;
$[\sigma_{TS}]_f$,	– границя міцності волокна і матриці (полімеру), відповідно, Па;
$[\sigma_{TS}]_m$	
σ_{eqM}^{max}	– еквівалентне напруження за Мізесом, Па;

Основні індекси:

0	– відноситься до початкового значення;
comp	– відноситься до композиту;
(e)	– відносяться до СЕ;

f	– відноситься до армувального волокна;
F	– відноситься до сили;
m	– відноситься до матриці;
sum	– відноситься до сумарного значення;
u	– відноситься до переміщення.

Символи:

$tr()$	– оператор сліду тензора;
∇	– оператор Гамільтона (“набла”), m^{-1} ;
$(.)$	– оператор скалярного добутку;
$(:)$	– оператор подвійного скалярного добутку тензорів.

Скорочення:

APDL	– ANSYS Parametric Design Language;
КМ	– композитний матеріал;
МКМ	– металічний композиційний матеріал;
МСЕ	– метод скінченних елементів;
НДС	– напружено-деформований стан;
ПА	– поліаміди;
ПВХ	– полівінілхлорид;
ПЕВТ	– поліетилен високого тиску;
ПЗ	– програмне забезпечення;
ПК	– полікарбонат;
ПЕНТ	– поліетилен низького тиску;
ПЕ	– поліетилен;
ПКМ	– полімерний композитний матеріал;
ПП	– поліпропілен;
ПС	– полістирол;
ПЕТФ	– поліетилентерефталат;
СЕ	– скінченний елемент;
СЛАР	– система лінійних алгебричних рівнянь.

ВСТУП

Актуальність теми. Полімери є одними із найпоширеніших матеріалів, що використовуються в пакувальній індустрії. Вони незамінні для виконання цілої низки функцій, і їх неперевершений баланс функцій у поєднанні зі спеціальними методами проектування й обробки часто дає можливість отримувати економічно вигідні рішення, які виправдовують їхні провідні позиції на ринку пакувальних матеріалів. Наразі європейський ринок пакувальних полімерів сягає 38 %, а ринок термопластів для упаковки в США – 29 %. Тобто ринок пакувальних матеріалів є найбільшим ринком для полімерів. Це перш за все визначається такими мотиваціями застосування полімерів порівняно з іншими матеріалами як технічні, економічні й естетичні. Однак, застосування полімерів для упаковки має певні недоліки, що стосуються їхньої нездатності до природного розкладання (біорозкладання) після використання під дією сил навколишнього середовища та характеристик міцності, наприклад, полімерних плівок. Вирішенням цієї подвійної проблеми може бути використання армованих природним волокном полімерів для пакування та дослідження їхніх механічних властивостей, які необхідні для проектування упаковки, що останнім часом дістало розвиток у пакувальній індустрії. Тому розробка складу нових армованих природним волокном полімерів для пакування та дослідження їхніх механічних властивостей є безумовно актуальним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано на кафедрі хімічного, полімерного та силікатного машинобудування (ХПСМ) та в науково-дослідному центрі «Ресурсозберігаючі технології» (НДЦ «РТ») Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» відповідно до наукових планів фундаментальних і прикладних досліджень НДЦ «РТ» з 2017 р. по 2018 р. у частині виконання механічних розрахунків: «Розроблення енергоефективного процесу високотемпературного оброблення сипучих вуглецевих матеріалів в електричних печах» 2017–2019 рр., №ДР 0117U000462; автор – виконавець теми.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є дослідження

ефективних механічних властивостей нових композитних полімерів залежно від матеріалів матриці й армувального волокна природного походження та його об'ємного вмісту в композиті.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі завдання:

1) Проаналізувати сучасний стан питання розробки та дослідження механічних властивостей пакувальних полімерних матеріалів, армованих природними волокнами.

2) Сформулювати математичні моделі задач напружено-деформованого стану (НДС) під час випробування зразків армованих полімерів у наближеннях ізотропного та ортотропного середовищ.

3) Визначити ефективні механічні властивості (модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, границю міцності, жорсткість та ударну в'язкість) композитних полімерних матеріалів для ізотропного та ортотропного наближень у разі односпрямованої орієнтації армувального волокна залежно від матеріалів матриці й волокна та його об'ємного вмісту за аналітичними формулами. З використанням границі міцності отримати значення силових навантажень під час розтягу зразків композиційного полімерного матеріалу.

4) Розробити числову методику та програмне забезпечення (ПЗ) для розв'язання задач НДС на базі методу скінченних елементів (МСЕ) в наближеннях ізотропного та ортотропного середовищ. Виконати верифікацію розробленого ПЗ – дослідити точність і збіжність числових розв'язків.

5) Виконати числові експерименти НДС зразків армованих полімерів для визначення ефективних механічних властивостей (модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, границю міцності, жорсткість та ударну в'язкість) залежно від матеріалів матриці і волокна та його об'ємного вмісту. Зіставити отримані механічні властивості з відповідними властивостями, розрахованими за аналітичними залежностями.

6) Розробити числову модель полімерної тари та виконати числовий аналіз її міцності для випадку армованого полімеру та порівняти з результатами, отриманими для звичайного полімерного матеріалу.

7) Розробити рекомендації щодо впровадження армованих полімерів з

використанням волокна природного походження в пакувальній індустрії.

Об'єкт дослідження – механічні властивості пакувальних полімерних матеріалів, армованих природними волокнами.

Предмет дослідження – залежності ефективних значень механічних властивостей композитних полімерів від зміни матеріалів матриці й волокна та його об'ємного вмісту.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження ґрунтуються на: 1) положеннях механіки суцільних середовищ; 2) достовірних гіпотезах і адекватних математичних моделях; 3) системах рівнянь механіки суцільного середовища з ізотропними і ортотропними властивостями; 4) застосуванні апробованого математичного апарату числового МСЕ; 5) розроблених числових методиках, алгоритмах і ПЗ; 6) верифікації розроблених числових моделей. Числові експериментальні дослідження виконано на зразках для випробування на розтяг з геометричними характеристиками за стандартом ASTM D638.

Наукова новизна отриманих результатів. У результаті виконаних у дисертації досліджень отримані такі наукові результати:

1) Обґрунтування застосування моделі ортотропного середовища для дослідження напружено-деформованого стану зразків полімерних армованих матеріалів.

2) Алгоритм визначення ефективних значень механічних характеристик армованих полімерів за допомогою розв'язання задач НДС для композитів з ортотропними властивостями.

3) Верифікація числової моделі НДС зразка композитного полімерного матеріалу під час випробування за стандартом ASTM D638 за даними числових експериментів, отриманих за допомогою ANSYS Mechanical APDL. Встановлено, що різниця між результатами розрахунків не перевищує 3,8 %, що є цілком прийнятним для проведення інженерних розрахунків з метою визначення ефективних значень механічних властивостей армованих полімерів.

4) Теоретичні дослідження залежності ефективних значень механічних властивостей (модуля пружності, коефіцієнта Пуассона, границі міцності,

жорсткості та ударної в'язкості) композитних полімерів, що піддаються деструкції в природних умовах, від зміни матеріалів матриці й волокна та його об'ємного вмісту.

Практичне значення одержаних результатів полягає у такому:

1) На базі МСЕ розроблено числову методику та ПЗ у середовищі Mathcad для розв'язання задач НДС для випадків ізотропного та ортотропного середовищ.

2) За результатами наукових досліджень отримано патент України, що включає спосіб пакування лікарських пігулок, зокрема, з використанням армованих природним волокном полімерів.

3) Розроблено рекомендації щодо впровадження в пакувальну індустрію армованих полімерів, що піддаються деструкції в природних умовах.

4) Результати дисертаційної роботи заплановано використати в навчальному процесі кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування КПІ ім. Ігоря Сікорського при викладанні дисципліни «Механіка суцільних середовищ» для спеціальності «Прикладна механіка», спеціалізації «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання пакування».

Особистий внесок здобувача. Здобувачем визначено стан і тенденції розвитку розробки, дослідження механічних властивостей та застосування армованих природним волокном полімерів для пакування. Взято участь у розробці математичних моделей НДС під час випробування зразків армованих полімерів. Проведено числовий аналіз НДС армованих полімерів різного складу та виконано дослідження ефективних значень модуля пружності, коефіцієнта Пуассона, границі міцності, жорсткості та ударної в'язкості залежно від матеріалів матриці й волокна та його об'ємного вмісту.

Розробку математичних моделей, узагальнення отриманих результатів на написання наукових статей здійснено разом з д.т.н., проф. Карвацьким А. Я., оформлення заявки на патент виконано разом з д.т.н., проф. Мікульонком О.І.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації доповідалися та обговорювалися на V і VI всеукраїнських науково-практичних конференціях, що відбувалися на кафедрі ХПСМ КПІ ім. Ігоря Сікорського «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки»

(Київ, 2017), а також на наукових семінарах кафедри ХПСМ КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 6 друкованих праць, у тому числі 2 наукові статті у науковому фаховому виданні України (подані), 3 доповіді в збірниках доповідей конференцій, отримано 1 патент України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, семи розділів, висновків, додатків і списку використаних джерел. Основна частина дисертації представлена на 129 сторінках і містить 31 рисунків. Загальний обсяг роботи становить 174 сторінок, у тому числі 3 додатки на 35 сторінках і список використаних джерел з 58 найменувань на 6 сторінках.

1 СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ РОЗРОБКИ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПАКУВАЛЬНИХ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ, АРМОВАНИХ ПРИРОДНИМИ ВОЛОКНАМИ

Наразі як прикладні, так і чисто наукові аспекти полімерного матеріалознавства дістали досить потужного розвитку. У одній із своїх праць професор Масачусетського технологічного інституту Albert Dietz пише: «Наука та техніка, подібно літературі й мистецтву, мають свої модні фрази та штампи. Тому одним із самих модернових виразів наразі є вираз «композиційні матеріали», який містить у новій формі дуже стару й просту думку про те, що спільна робота різнорідних матеріалів дає ефект, рівносильний створенню нового матеріалу, властивості якого кількісно і якісно відрізняються від властивостей кожного з його складових».

Ще на початку 80-х рр. XX століття було сформульовано основний принцип розробки сучасних композитних матеріалів (КМ), який передбачає комплексне вирішення питань вибору композиційних матеріалів, проектування з них конструкцій та розробки технологічних процесів. Саме це є трьома сторонами єдиної проблеми, тому в багатьох випадках одночасно розробляється нова конструкція, композиційний матеріал для її виготовлення та технологічний процес отримання деталей [1].

1.1 Класифікація композиційних матеріалів

Наразі єдиної загальновизнаної класифікації композиційних матеріалів не існує, оскільки КМ являють собою самий широкий клас матеріалів, що об'єднує метали, полімери й кераміку. Найбільш часто використовується класифікація композиційних матеріалів, в основу якої покладено їх поділ за матеріалознавчими ознаками [2, 3].

1.1.1 Класифікація КМ за матеріалом матриці

Найбільш важливою ознакою класифікації КМ є матеріал матриці. КМ з металевою матрицею називають металічними композиційними матеріалами (МКМ), з полімерною матрицею – полімерними композиційними матеріалами (ПКМ), з керамічною – керамічними композиційними матеріалами (ККМ). КМ, які містять два і більше різних за складом матричних матеріалів, називають поліматричними [1].

Назва ПКМ зазвичай складається з двох частин. У першій частині називається матеріал наповнювача, а в другій наводиться слово «пластик». Наприклад, полімерні композити, армовані скловолокном, називаються склопластиками, металічними волокнами – металопластиками, органічними волокнами – органопластиками, вуглецевими волокнами – вуглепластиками, азбестовими волокнами – азбопластиками тощо.

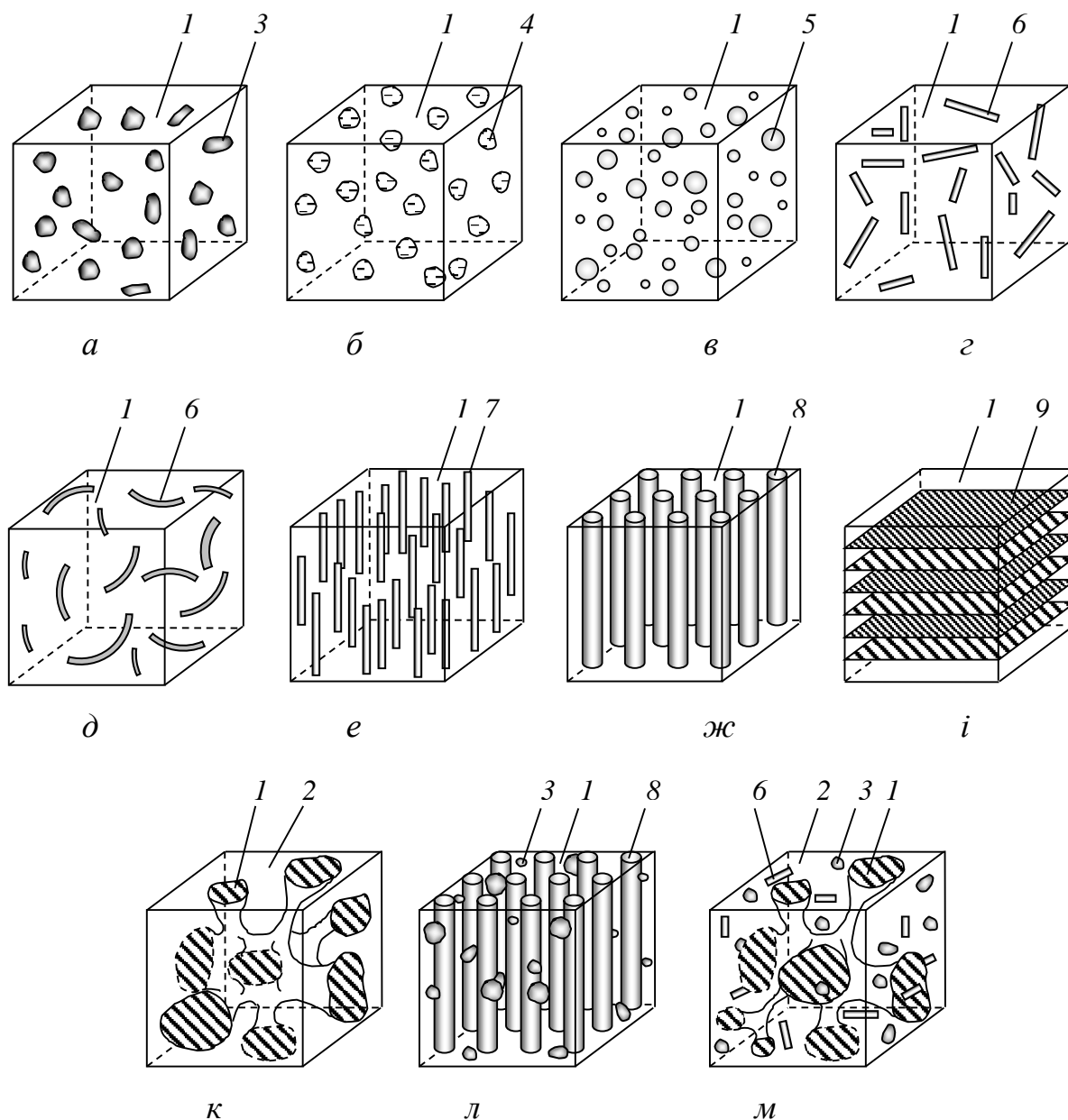
Для характеристики металічних КМ найчастіше використовують подвійне позначення: спочатку пишуть матеріал матриці, а потім – матеріал волокна. Наприклад, позначення мідь-вольфрам (Cu-W) відповідає композиційному матеріалу, в якому матрицею є мідь, а волокнами – вольфрам.

Для керамічних КМ характерно таке саме позначення, як і для МКМ. Наприклад, позначення окис алюмінію-молібден ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo}$) відповідає композиційному матеріалу з матрицею з окису алюмінію і молибденовими волокнами.

У деяких випадках для позначення КМ використовується одне складне слово, наприклад бороалюміній або вуглеалюміній. У цьому випадку перша частина слова відповідає матеріалу волокна, а друга – матеріалу матриці.

1.1.2 Класифікація КМ за геометрією армувальних наповнювачів

Класифікація згідно геометрії армувальних наповнювачів (порошок або гранули, волокна, пластини) наведена на рисунку 1.1 і в таблиці 1.1 [1, 2].



1, 2 – матриці; 3, 4, 5 – твердий, рідкий і газоподібний дисперсний наповнювач;
6 – короткі волокна; 7 – довгі волокна; 8 – безперервні волокна; 9 – шаруватий
наповнювач

Рисунок 1.1 – Основні типи дисперснонаповнених (а–д), армованих (е–і, л) і
комбінованих (л, м) структур композиційних матеріалів (структури з–ж –
волокнисті матеріали; структура і – шаруватий матеріал)

Таблиця 1.1 – Класифікація композиційних матеріалів за геометричними характеристиками наповнювача

Армувальні елементи	Композиційні матеріали
Порошки	Порошкові – дисперсно-зміцнені КМ
Волокна	Волокнисті – КМ, армовані суцільними і дискретними волокнами
Пластини	Пластинчасті – шаруваті КМ, що складаються з безперервних і дискретних пластин

1.1.3 Класифікація КМ за структурою і розташуванням компонентів

Згідно цієї класифікації КМ поділяються на групи з матричною, шаруватою, каркасною та комбінованою структурою. Матричну структуру мають дисперсно-зміцнені (див. рисунок 1.1 *a–d*) та армовані (див. рисунок 1.1 *e–i, л*) КМ [2, 4–6].

До матеріалів із шаруватою структурою (див. рисунок 1.1 *i*) відносяться композиції, отримані за допомогою набору шарів фольги, що чергуються, або листів матеріалів різної природи та складу.

До композиційних матеріалів з каркасною структурою відносяться матеріали, отримані методом просочення.

Комбіновану структуру мають матеріали, що містять комбінації перших трьох груп (див. рисунок 1.1 *л, м*).

1.1.4 Класифікація матричних КМ за схемою армування

За орієнтацією й типу арматури всі КМ можна поділити на дві групи – ізотропні і анізотропні. Ізотропними називають матеріали, які мають однакові властивості за всіма напрямками. Властивості анізотропних матеріалів залежать від напрямку в дослідному зразку.

КМ з матричною структурою поділяються на хаотично-армовані та упорядковано-армовані (див. рисунок 1.1). Хаотично-армовані КМ містять армувальні елементи у вигляді дисперсних включень, дискретних або неперервних волокон. Ці матеріали є ізотропними або квазіізотропними. Термін

«квазіізотропний» означає, що КМ є анізотропним у мікрооб'ємі, але ізотропним в об'ємі всього виробу.

Упорядковано-армовані КМ поділяються на односпрямовані, тобто одновісно армовані, двовісно-армовані (з площинним розташуванням арматури) та тривісно-армовані (з об'ємним розташуванням арматури) [1, 7].

1.1.5 Класифікація КМ за методами одержання (технологічний принцип)

Згідно з цією класифікацією КМ поділяються на матеріали, отримані рідкофазними та твердофазними методами, а також методами осадження – напилення, комбінованими методами [1, 7].

До рідкофазних методів відносяться просочення (просочення арматури полімерами або розплавленими металами) та спрямована кристалізація сплавів.

До твердофазних методів отримання КМ відносять прокатка, екструзія, ковка, штамповка, ущільнення вибухом, дифузійне зварювання, волочіння тощо. Композиційні матеріали, отримувані твердофазними методами, використовуються у вигляді порошку або тонких листів.

У разі отримання КМ методами осадження – напилення матриця наноситься на волокна з розчинів солей або інших сполук, із парогазової фази, із плазми тощо.

Комбіновані методи полягають у послідовному або паралельному застосуванні декількох методів.

1.1.6 Класифікація КМ за призначенням (експлуатаційний принцип)

Класифікація КМ за призначенням достатньо умовна, оскільки часто композити є багатофункціональними матеріалами. Тим не менш, серед множини КМ виділяють матеріали загально-конструкційного призначення (несучі конструкції кораблів, літаків, автомобілів тощо), жароміцні матеріали (лопатки турбін двигунів літаків, камери згорання), термостійкі матеріали (вироби, що працюють в умовах частих тепло-змін), фрикційні матеріали (гальмівні колодки), антифрикційні

матеріали (підшипники ковзання), ударостійкі матеріали (броня), теплозахисні матеріали, матеріали зі спеціальними властивостями (магнітними, електричними) тощо.

1.2 Полімерні матриці

Полімерну матрицю для композиційних матеріалів зазвичай вибирають, враховуючи умови експлуатації виробів [1, 2]. Від матеріалу матриці значно залежать властивості композита: міцність, тепло- та вологостійкість, стійкість до дії агресивних середовищ, метод одержання виробу. Полімери для матриці використовують або в чистому вигляді (порошки, гранули, листи, плівки), або у вигляді зв'язувального.

Зв'язувальне представляє собою двох- або багатокомпонентну систему із синтетичного полімеру й отверджувачів, ініціаторів або каталізаторів, прискорювачів затвердіння. У зв'язувальне з метою придання необхідних технологічних та експлуатаційних властивостей можуть бути додані розчинники, красителі, пластифікатори, стабілізатори та інші компоненти.

У виробництві армованих пластиків найбільш часто застосовують термореактивні зв'язувальні, під час нагрівання яких відбуваються незворотні структурні та хімічні перетворення; неперервно розширюється використання термопластичних полімерів та еластомерів.

Розглянемо більш детально характеристики матриць з термопластичних полімерів.

1.2.1 Термопластичні полімери

Термопластичні полімери (термопласти) – це полімери, які розм'якшуються під час нагрівання і твердіють у разі охолодження [1, 2, 8–12].

За звичайної температури термопласти знаходяться в твердому (склоподібному або кристалічному) стані. У разі підвищення температури вони

переходять у високоеластичний і далі у в'язкотекучий стан, що забезпечує можливість їх формування різноманітними методами. Ці переходи є зворотними і можуть повторюватися багатократно, що дає можливості, зокрема, переробки побутових та промислових відходів у виробі.

Вибір термопласта визначається дуже багатьма факторами: умовами експлуатації виробу, технологічними властивостями полімеру, ціною пластмаси, її доступністю тощо.

Поліетилен (ПЕ) – один із найбільш широко використовуваних полімерів. Промисловістю випускається поліетилен низького тиску (ПЕНТ) і поліетилен високого тиску (ПЕВТ). Міцність, теплостійкість й хімічна стійкість ПЕНТ вища, чим ПЕВТ. Газопроникність, навпаки, вища в ПЕВТ. Деструкція поліетилену протікає за температур вищих 290 °С, а сонячна радіація веде до термостаріння. За кімнатних температур поліетилен стійкий до дії розбавлених сірчаної і азотної кислот, концентрованої соляної, фосфорної та плавикової кислот, володіє низьким водопоглинанням.

ПЕ переробляється литтям під тиском, екструзією, пресуванням, добре зварюється та механічно обробляється.

Поліпропілен (ПП) має високу зносостійкість і добре витримує згин. За відсутності повітря термодеструкція проявляється при 300 °С. Поліпропілен стійкий до дії багатьох кислот й лугів. Концентрована сірчана кислота слабо руйнує поліпропілен за кімнатної температури і катастрофічно за мінус 60 °С. До дії сильних окиснювачів поліпропілен нестійкий. Поліпропілен переробляється литтям під тиском, екструзією, вакуум-формуванням, пневмо-формуванням, роздувом, зварюванням, пресуванням, напиленням, обробляється різанням.

Полістирол (ПС) – крихкий полімер, який має високу радіаційну стійкість, легко піддається старінню. Термічна деструкція ПС починається за температури понад 266 °С. Полістирол стійкий до дії деяких мінеральних та органічних кислот, лугів, трансформаторного масла, руйнується дією концентрованої азотної та оцтової кислот.

Технології переробки ПС: лиття під тиском, екструзія, вакуум-формування, пневмо-формування.

Політетрафторетилен – це лінійний полімер, який має хімічну формулу $[-CF_2-CF_2-]_n$, торгові марки політетрафторетилена: фторопласт-4 (Росія), тефлон (США), поліфлон (Японія) тощо.

Ступінь кристалічності полімера – 95 %, температура плавлення ($T_{пл}$) – 310-315 °С, густина – 2100-2300 кг/м³ (найбільша з існуючих полімерів). Полімер непрозорий. Розкладається з виділенням сполук фтору за температури ($T_{дестр}$) понад 415 °С. Фторопласт-4 має властивості самозмащення, має низький коефіцієнт тертя. Це найбільш хімічно стійкий до дії висококонцентрованих і розведених кислот та лугів, сильних окиснювачів, не схильний до дії грибків. Чудовий діелектрик.

Фторопласт-4 переробляється спіканням попередньо спресованих таблеток. Після попередньої спеціальної обробки полімер обробляється різанням, зварюється та склеюється. Деякі модифікації фторопласта переробляються методами порошкової металургії, пресуванням, екструзією, литтям під тиском, напилюванням.

Полівінілхлорид (ПВХ) – аморфний полімер з хорошими електроізоляційними властивостями, стійкий до хімічних реагентів, не підтримує процес горіння. Атмосферостійкий, за температури понад 150-170 °С розкладається з виділенням хлороводню, теплоти та утворенням подвійних зв'язків. Має низку морозостійкість (до мінус 10 °С) й теплостійкість.

Поліметиленоксид – лінійний полімер з хімічною формулою $[-CH_2-O-]_n$. За кордоном поліметиленоксид відомий під назвою «ацетальна або поліацетальна смола». Полімер добре опирається втомним і динамічним знакозмінним навантаженням, має низку повзучість й високу зносостійкість, володіє низьким коефіцієнтом тертя по сталі (0,2-0,35).

Для переробки поліметиленоксида використовують метод лиття під тиском, екструзію. Матеріал добре обробляється різанням.

Поліфеніленсульфід – простий ароматичний поліефір. Отримується поліконденсацією солей діфенілолпропана з 4,4'-діхлордіфенілсульфоном. Характеризується високою термостійкістю, стійкістю до окиснення, радіаційною

стійкістю. За хімічною стійкістю поступається тільки політетрафторетилену. Вироби із поліфеніленсульфіда можуть довгий час експлуатуватися за температури 260 °С, механічні та фізичні властивості полімера зберігаються незмінними на протязі 200 год за температури 260 °С, повне розкладання відбувається при 720 °С.

Поліфеніленсульфід переробляється литтям під тиском, пресуванням, плазмовим напилюванням, використовується для просочення тканини.

Поліетилентерефталат (ПЕТФ) – складний лінійний ароматичний поліефір терефталевої кислоти або лавсан. Полімер відрізняється низьким коефіцієнтом тертя та гігроскопічністю. Для виробів, виготовлених з нього характерна стабільність форми. Поліетилентерефталат стійкий до дії слабких кислот, мінеральних солей, ефірів, жирів.

ПЕТФ переробляється литтям під тиском.

Полікарбонат (ПК) – це складний поліефір хлорангідріда вугільної кислоти (фосгена) і дифенілолпропана. Полікарбонати також випускаються під маркою «дифлон». Полімер оптично прозорий, стійкий до дії ультрафіолетового випромінювання, має низьку гігроскопічністю та стійкістю до дії мікроорганізмів.

Для виробів, виготовлених із нього, характерна висока стабільність розмірів.

Полікарбонати перероблюються всіма методами, використовуються для переробки термопластичних полімерів. Температура переробки складає 240...300 °С. Вироби із полікарбонатів можна зварювати, склеювати, обробляти різанням, з'єднуються заклепками та цвяхами.

Поліарілати – складні ароматичні поліефіри двохатомних фенолів. Отримують поліконденсацією хлорангідріда терефталевої кислоти з солями дифенілолпропана. Мають високу міцність і термостійкістю. У деяких випадках успішно конкурують з конструкційними металічними матеріалами. Температура термічного розкладання поліарілатів складає 420 °С. Полімери стійкі до дії ультрафіолетового та іонізуючого випромінювання, до тривалої дії розбавлених мінеральних та органічних кислот, бензину, керосину.

Залежно від марки поліарілати переробляються у вироби литтям під тиском, литтєвим та компресійним пресуванням, екструзією, формуванням з роздувом.

Поліаміди (ПА) добре відомі за марками «капролон», «найлон-7», «найлон-11» та ін. Отримують іонною полімеризацією капролактама ($-\text{NH}-\text{CO}-(\text{CH}_2)_5-$). Для полімерів характерні висока втомна міцність, зносостійкість, ударна в'язкість, низька гігроскопічність, стабільність властивостей за підвищених температур, різко виражена температура плавлення. Поліаміди стійкі до дії органічних розчинників.

Основні способи одержання виробів із аліфатичних поліамідів – лиття під тиском і екструзія. Ароматичні поліаміди перероблюються методом прямого пресування з попереднім підігрівом.

Таким чином, для більшості термопластів характерні такі властивості: більш висока продуктивність та більш інтенсивні методи переробки; формування виробів менш енергоємне; можливе формування складної конфігурації виробів; можлива вторинна переробка; понижена горючість, димовиділення під час горіння й токсичність продуктів горіння; висока стійкість до випромінювання; поєднання високої міцності й теплостійкості з високою ударною міцністю та тріщиностійкістю.

1.2.2 Еластомери

Еластомери застосовуються в промисловості переробки пластмас найчастіше всього як високомолекулярні пластифікатори для зниження крихкості склоподібних або кристалічних полімерів [1]. Застосування еластомерів у складі полімерних композиційних матеріалів утруднено пониженим опором тепловому старінню й термоокиснюванню деструкції. Крім того, підвищена липкість, деформування еластомерів зазвичай не дають змоги випускати їх у гранульованому вигляді (лише небагато еластомерів доступні зараз у вигляді гранул), що також утруднює їх використання. Тим не менш, застосування еластомерів як компонентів сумішевих композиційних матеріалів (у том числі конструкційних) неперервно розширюється.

1.3 Наповнювачі композитних полімерів

До наповнювачів полімерів відносяться тверді, рідкі та газоподібні органічні та неорганічні речовини, які розподіляються в неперервній фазі полімеру (матриці) с

утворенням гетерофазної системи з вираженою границею поділу фаз [1–12]. Наповнювачі вводять у полімери з метою створення нових полімерних матеріалів з комплексом цінних експлуатаційних властивостей; поліпшення технологічних властивостей та перероблення наповнених полімерів; здешевлення матеріалів; утилізація відходів та вирішення екологічних задач тощо. До основних видів наповнювачів належать: дисперсні (крейда, азбест, гідроксид алюмінію, тальк та ін.), волокнисті (металічні, скляні, вуглецеві, борні, органічні, зокрема природного походження, керамічні, нитковидні кристали), листові (тканини, папір, деревний шпон, стрічки, полотно, сітки, неткані матеріали), об'ємні (об'ємні тканини, каркасні системи).

1.3.1 Волокнисті наповнювачі

Наповнювачі у вигляді волокон, ниток, джгутів, рублених джгутів використовують для створення конструкційних, високоміцних, високомодульних армованих полімерних матеріалів. Ефективність волокон у пластику зростає зі збільшенням їх довжини.

Існує поняття критичної довжини волокна $l_{кр}$ [2, 4]. Ця довжина волокна, до якої напруження, сприймається власне волокном у полімері, зростає та при l рівної $l_{кр}$ стає рівним міцності волокна.

У разі руйнування пластику, наповненого волокном з $l < l_{кр}$, спостерігається висмикування коротких волокон з полімерної матриці, тобто пластик руйнується по границі волокно – полімер. Тепер волокна з $l > l_{кр}$ самі руйнуються та повністю реалізують свою міцність в полімерній матриці. Критична довжина волокон залежно від їх природи змінюється від 100 мкм (вуглецеві волокна) до 400 мкм (скляні волокна).

Значення $l_{кр}$ (мм) скляних волокон (діаметр волокна $d \sim 10$ мкм) для різних полімерних матриць різні: для ПЕ – 1,8; ПП – 0,6; ПС – 0,36; ПА – 0,26. Чим менше значення $l_{кр}$ волокна, тим ефективніше волокно з $l > l_{кр}$ зміцнює полімерну матрицю.

Волокна довжиною. 0,2-14 мм (короткі волокна) використовуються для одержання конструкційних литєвих і екструзійних термопластичних матеріалів; довжиною менше 1-2 мм – для заливальних компаундів з малою усадкою; довжиною від 15 мм до 70 мм (довгі волокна) – для отримання прес-матеріалів (волокнитів та премиксів на основі фенолоформальдегідних та поліефірних смол); неперервні волокна ($l \rightarrow \infty$) – для створення високоміцних, високомодульних армованих ПКМ.

Основні види неорганічних волокон (вуглецеві, скляні) випускаються круглого січення діаметром 8-20 мкм, а також трикутного, ромбічного та інших форм. Оптимальне значення діаметра волокна $d_{\text{опт}}$ залежить від його природи і полімерної матриці, а також від методу формування та розмірів виробів.

Значення параметра максимальної об'ємної частки наповнювача ϕ_{max} для неперервних волокон можна збільшити, використовуючи волокна різних діаметрів (щільні склади) і січень (трикутні, квадратні, ромбічні). Полімерні та металічні волокна ущільнюються під тиском, перепрофілюються, і значення ϕ_{max} може досягати 1.

1.3.2 Листові наповнювачі

Волокнистим наповнювачам можна надавати й фіксувати плетінням, склеюванням та іншими методами різну структуру. Листові (плівкові) наповнювачі із заданою структурою у вигляді тканини різноманітного плетіння (сатинове, саржеве, полотняне), паперу, деревного шпона, стрічок, полотна, тканих ровингів, сіток та нетканих матеріалів використовують для отримання шаруватих пластиків.

Із шаруватих пластиків найбільше поширення отримав текстоліт. Для виготовлення текстоліту легкі (маса 1 м² – до 150 г), середні (до 300 г) та важкі (більше 300 г) тканини різного плетіння та неткані волокнисті матеріали масою до 820 г. Широко використовуються бавовняні (бязь, миткаль, бельтинг, шифон) і синтетичні тканини (віскозні, ацетатні, поліамідні, поліефірні). Найпоширенішими наповнювачами є скло- та вуглецеві тканини та матеріали на їх основі –

склотекстоліти і карботекстоліти. Порівняно зі склотекстолітами (густина 1600-2100 кг/м³) органотекстоліти мають меншу густину (1300-1400 кг/м³) й теплопровідність, краще піддаються механічній обробці, але поступаються за міцністю, тепло- й хімічною стійкістю.

Природу волокна, вид плетіння, масу 1 м², пористість листових наповнювачів вибирають залежно від вимог, що висуваються до виробів. Наповнювачі у вигляді сіток використовують для армування полімерних матеріалів у двох напрямках, а також для отримання антифрикційних стрічкових матеріалів. Матеріалом для виготовлення сіток частіше всього слугують металічні, скляні, вуглецеві та полімерні волокна.

1.3.3 Об'ємні наповнювачі

До об'ємних наповнювачів полімерів відносяться об'ємні тканини, відкритопоруваті каркасні системи, структура яких неперервна в трьох напрямках. Відкритопорувата об'ємна структура наповнювача формується в процесі ткання або шляхом спінювання, або спікання порошків металів, кераміки і полімерів. Природна деревина також може бути використана як об'ємний наповнювач. До основних характеристик таких наповнювачів відноситься об'ємна маса, загальна, закрита та відкрита поруватість та розміри пор. У процесі заповнення пор каркасного наповнювача полімерним зв'язувальним формується взаємопроникна структура матеріалу. Властивості таких систем залежно від концентрації наповнювача в різних напрямках можуть бути ізотропними або анізотропними та визначаються властивостями вихідних компонентів, їх співвідношенням і ступенем просочення.

1.4 Одержання заготовок полімерних композиційних матеріалів

У виробництві полімерних композиційних матеріалів широко використовуються проміжні напівфабрикати у вигляді препрегів [1].

Для підвищення жорсткості на вигин конструкцій застосовуються стільникові заповнювачі.

Препрег являє собою напівфабрикат, який зберігається у вигляді рулонів або пакетів. При цьому шари препрега розділяються плівкою. Напівфабрикати мають значний термін зберігання. За кімнатної температури термін зберігання препрегів складає ~ 3 міс. Охолоджені препреги можуть зберігати свої властивості до 1 року.

За кімнатної температури препреги набувають технологічні властивості «чистих» матеріалів. Ступінь липкості, характерна для даної температури, робить зручним процес ручної викладки. Препреги можуть розкроюватися на станках з числовим програмним управлінням.

1.4.1 Одержання препрегів методом просочення арматури смолами

Для виготовлення препрегів використовуються просочувальні установки вертикального або горизонтального типів [1, 13, 14].

Принцип дії цих установок такий. Нитки з волокон наповнювача надходять зі шпулярника, формуються у стрічку, підсушуються нагрівником, після чого попадають у ванну зі зв'язувальним. Просочена зв'язувальним стрічка віджимається в спеціальному пристрої і підсушується в печі. Готовий препрег покривається розділовою плівкою і змотується в рулон.

Препрег, отриманий на спеціальних просочувальних установках, відрізняється високою якістю просочення, мінімальними пошкодженнями волокон, рівномірністю вмісту зв'язувального.

1.4.2 Одержання препрегів з використанням порошкових дисперсних полімерів

Наразі розробляються та застосовуються методи одержання препрегів з використанням полімерів, що знаходяться в тонкодисперсному порошкоподібному стані.

Для нанесення порошкових полімерних матеріалів на волокнистий наповнювач їх переводять у псевдо-зріджений («киплячий») стан у результаті продування газом, під дією механічних коливань (вібро-зрідження) або за умови спільної дії продувального газу й механічних коливань (вібрації) [1].

Можливе також електростатичне нанесення порошків на волокнисту арматуру (рисунок 1.2).

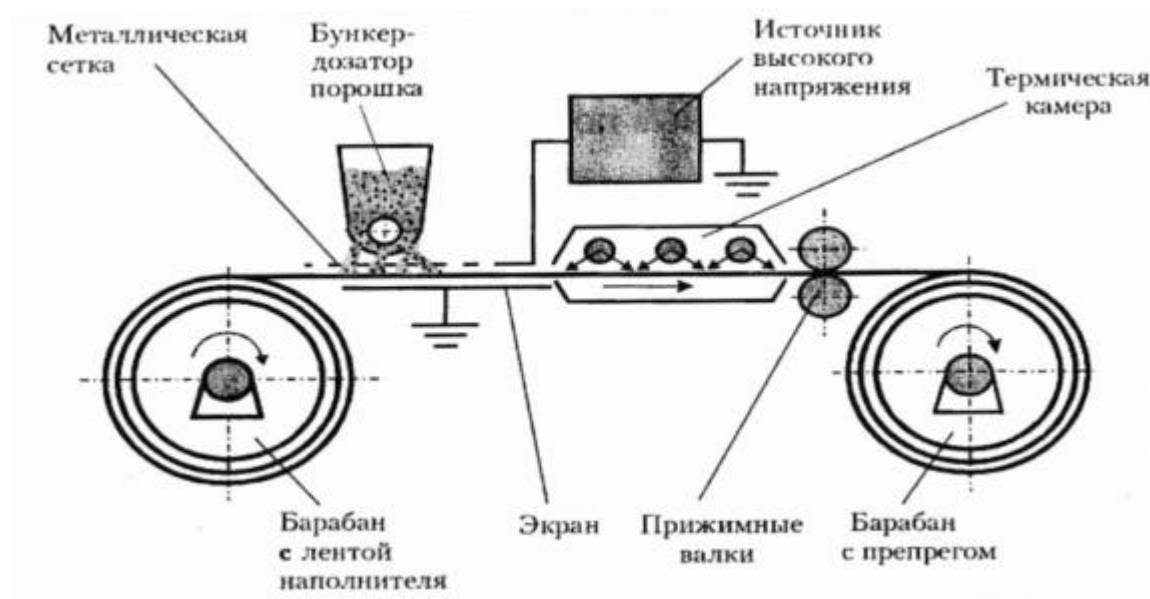


Рисунок 1.2 – Схема одержання препрегів на основі дисперсного порошку полімера

Процес нанесення полімерів полягає в зарядженні частинок порошку в наслідок дії на них зовнішнього електростатичного поля, переносі їх в цьому полі, осадження й утримання на волокнах. У результаті цього в об'ємі волокнистого наповнювача формується електроосаджений шар заряджених частинок.

Технологія одержання препрегів, що базується на використанні дисперсного зв'язувального має значне технічні й економічні переваги порівняно з іншими методами виготовлення препрегів.

Також існують методи виготовлення препрегів з використанням спеціальних екструдерів [9, 13].

1.5 Теоретичні основи напружено-деформованого стану полімерних композитів

1.5.1 Співвідношення напруження – деформація для анізотропних матеріалів

Узагальнений закон Гука можна записати з використанням одноіндексної форми запису тензорів напруження і деформації та двоіндексної – для тензора механічних констант [7, 15]

$$\sigma_i = C_{ij} \varepsilon_j, \quad i, j = \overline{1,6}, \quad (1.1)$$

де σ_i – компоненти тензора напруження (рисунок 3.1); C_{ij} – матриця жорсткості або тензор механічних констант матеріалу; ε_j – компоненти тензора деформації.

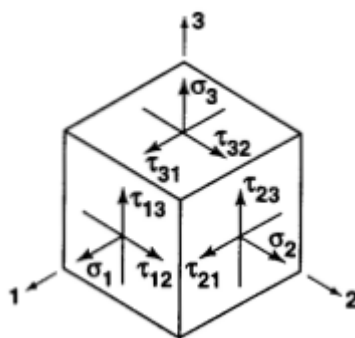


Рисунок 1.3 – Компоненти тензора напруження

Порівняння одноіндексного позначення тривимірних тензорів напруження і деформації зі звичайними тензорними позначеннями наведено в таблиці 1.2 для випадку, коли тензори напружень та деформацій є симетричними. Згідно таблиці 1.2 компоненти тензора деформації визначаються як:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{\partial u_1}{\partial x_1}; \quad \varepsilon_2 = \frac{\partial u_2}{\partial x_2}; \quad \varepsilon_3 = \frac{\partial u_3}{\partial x_3}; \\ \gamma_{12} &= \frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1}; \quad \gamma_{23} = \frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2}; \quad \gamma_{31} = \frac{\partial u_3}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_3}, \end{aligned} \quad (1.2)$$

де u_i , $i=1,2,3$ – компоненти вектора переміщення; 1,2,3 – напрямки, що відповідають декартовим координатам x, y, z .

Таблиця 1.2 – Тензорне і узагальнене (одноіндексне) позначення тензорів напруження і деформації [7]

Напруження		Деформації	
Тензорне позначення	Одноіндексне позначення	Тензорне позначення	Одноіндексне позначення
σ_{11} (σ_1)	σ_1	ε_{11} (ε_1)	ε_1
σ_{22} (σ_2)	σ_2	ε_{22} (ε_2)	ε_2
σ_{33} (σ_3)	σ_3	ε_{33} (ε_3)	ε_3
$\tau_{23} = \sigma_{23}$	σ_4	$\gamma_{23} = 2\varepsilon_{23}$	ε_4
$\tau_{31} = \sigma_{31}$	σ_5	$\gamma_{31} = 2\varepsilon_{31}$	ε_5
$\tau_{12} = \sigma_{12}$	σ_6	$\gamma_{12} = 2\varepsilon_{12}$	ε_6

Матриця жорсткості, C_{ij} має 36 констант у рівнянні (2.1). Проте менш ніж 36 констант можуть бути незалежними для пружних матеріалів, коли розглядаються важливі характеристики енергії деформації. Еластичні матеріали, для яких існує пружний потенціал або функція густини енергії деформації, прирощення роботи на одиницю об'єму визначається як

$$dW = \sigma_i d\varepsilon_i, \quad (1.3)$$

де напруження σ_i є результатом наявності прирощення деформації $d\varepsilon_i$.

З врахування (1.1) рівняння (1.3) набуває вигляду

$$dW = C_{ij} \varepsilon_j d\varepsilon_i, \quad (1.4)$$

Після інтегрування по всіх компонентах деформації, робота на одиницю об'єму буде становити

$$W = \frac{1}{2} C_{ij} \varepsilon_i \varepsilon_j. \quad (1.5)$$

З врахуванням (1.5) закон Гука (1.1) можна записати у формі

$$\frac{\partial W}{\partial \varepsilon_i} = C_{ij} \varepsilon_j, \quad (1.6)$$

після чого нескладно визначити C_{ij}

$$\frac{\partial^2 W}{\partial \varepsilon_i \partial \varepsilon_j} = C_{ij}. \quad (1.7)$$

Аналогічним чином можна записати, що

$$\frac{\partial^2 W}{\partial \varepsilon_j \partial \varepsilon_i} = C_{ji}. \quad (1.8)$$

Але порядок диференціювання W не має значення, тоді можна записати

$$C_{ij} = C_{ji}. \quad (1.9)$$

Таким чином, матриця жорсткості є симетричною, тому лише 21 констант із 36 є незалежними. Аналогічним чином можна показати що

$$W = \frac{1}{2} S_{ij} \sigma_i \sigma_j, \quad (1.10)$$

де S_{ij} – матриця піддатливості, яка є оберненою до матриці жорсткості.

Тому деформації можна виразити через напруження співвідношенням

$$\varepsilon_i = S_{ij} \sigma_j, \quad i, j = \overline{1,6}. \quad (1.11)$$

Матриця піддатливості, так само як і матриця жорсткості, є симетричною, лише 21 компоненти якої є незалежними.

1.5.2 Жорсткість, піддатливість та інженерні константи для ортотропних матеріалів

До інженерних констант або технічних констант відносяться модуль пружності E , коефіцієнт Пуассона ν та модуль зсуву G [7]. Ці константи вимірюються за допомогою простих випробувань, таких як одноосьовий розтяг або чисто зсувні випробування. Таким чином, ці константи з їх очевидною фізичною інтерпретацією мають більш пряме значення, ніж компоненти відносно абстрактних матриць піддатливості та жорсткості.

Найпростіші тестування матеріалу характеризуються відомим силовим навантаженням або напруженням, в результаті яких вимірюється переміщення або деформація. Інженерні константи, як правило, є нахилом кривої напруження-деформації (наприклад, $E = \sigma/\varepsilon$) або кривої деформація-деформація (наприклад, $\nu = -\varepsilon_2/\varepsilon_1$ для $\sigma_1 = \sigma$ і $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$). Таким чином, компоненти матриці піддатливості (S_{ij}) визначаються більш безпосередньо, ніж матриці жорсткості (C_{ij}). Для ортотропного матеріалу компоненти матриці піддатливості в термінах інженерних констант мають вигляд

$$[S_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_3} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix}, \quad (1.12)$$

де E_1, E_2, E_3 – компоненти вектора модуля пружності для напрямків 1, 2, 3, відповідно; ν_{ij} – коефіцієнт Пуассона $\nu_{ij} = -\varepsilon_j / \varepsilon_i$ для $\sigma_i = \sigma$, а інші напруження дорівнюють нулю; G_{23}, G_{31}, G_{12} – модуль зсуву на площинах 2-3, 3-1 і 1-2, відповідно.

Ортотропний матеріал має дев'ять незалежних констант, оскільки

$$S_{ij} = S_{ji}. \quad (1.13)$$

Підстановка технічних констант в (1.13) дає рівняння

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j}, \quad i, j = \overline{1,3}, \quad i \neq j. \quad (1.14)$$

З врахуванням (1.14), слід розглядати лише ν_{12} , ν_{13} та ν_{23} , оскільки ν_{21} , ν_{31} та ν_{32} можуть бути виражені в термінах першої згаданої групи коефіцієнтів Пуассона та модулів Юнга.

1.5.3 Обмеження для інженерних констант

Ізотропні матеріали [7].

Для ізотропних матеріалів необхідно задовольнити певні зв'язки між інженерними константами. Наприклад, модуль зсуву визначається через модуль пружності, E та коефіцієнт Пуассона ν , як

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}. \quad (1.15)$$

Таким чином, для того, щоб E та G були завжди позитивними, необхідно виконання такої умови

$$\nu > -1. \quad (1.16)$$

Аналогічним чином, якщо ізотропне тіло піддається гідростатичному тиску p , тобто $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = -p$, то об'ємна деформація дорівнює сумі нормальних деформацій

$$\theta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = p \frac{3(1-2\nu)}{E} = \frac{p}{K}, \quad (1.17)$$

де K – об'ємний модуль

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}. \quad (1.18)$$

Таким чином, K є позитивним лише тоді, коли E є позитивним, звідки і знаходимо, що

$$\nu < \frac{1}{2}. \quad (1.19)$$

Нарешті, для ізотропних матеріалів коефіцієнт Пуассона обмежений діапазоном

$$-1 < \nu < \frac{1}{2}, \quad (1.20)$$

тому зсувне або гідростатичне навантаження не створює негативної енергії деформації.

Ортотропні матеріали [7].

Для ортотропних матеріалів відношення між інженерними константами є більш складними порівняно з ізотропними. По-перше, результат напруження та відповідна деформація представляє роботу, виконану напруженням. Сумарна робота за рахунок напруження повинна бути позитивною, щоб уникнути створення додаткової енергії. Ця остання умова забезпечує термодинамічні обмеження на

значення інженерних констант. Таким чином, як матриця жорсткості, так і піддатливості повинні бути позитивно визначеними.

Якщо до тіла прикладається лише одне нормальне напруження, відповідна деформація визначається діагональними елементами матриці піддатливості. Таким чином, ці елементи повинні бути позитивними, тобто

$$S_{11}, S_{22}, S_{33}, S_{44}, S_{55}, S_{66} > 0, \quad (1.21)$$

або, з точки зору інженерних констант,

$$E_1, E_2, E_3, G_{23}, G_{31}, G_{12} > 0. \quad (1.22)$$

Аналогічним чином, при відповідних обмеженнях можлива деформація, при якій виникає лише одновісне розтягнення. Знову ж таки, робота виконується лише відповідним напруженням. Отже, оскільки виконана робота визначається діагональними елементами матриці жорсткості, то ці елементи повинні бути також позитивними, тобто

$$C_{11}, C_{22}, C_{33}, C_{44}, C_{55}, C_{66} > 0. \quad (1.23)$$

Звідки можна записати обмеження для коефіцієнтів Пуассона

$$(1 - \nu_{23}\nu_{32}) > 0, \quad (1 - \nu_{13}\nu_{31}) > 0, \quad (1 - \nu_{12}\nu_{21}) > 0, \quad (1.24)$$

тому що детермінант матриці повинен бути позитивним, оскільки матриця повинна бути позитивно визначеною. Для компонент матриці піддатливості також будуть справедливі такі нерівності

$$|S_{23}| < \sqrt{S_{22}S_{33}}, \quad |S_{13}| < \sqrt{S_{11}S_{33}}, \quad |S_{12}| < \sqrt{S_{11}S_{22}}. \quad (1.25)$$

Використовуючи умову симетрії (1.14) і нерівності (1.24) можна записати обмеження для компонент коефіцієнта Пуассона

$$\begin{aligned}
|v_{21}| &< \sqrt{E_2/E_1}, \quad |v_{32}| < \sqrt{E_3/E_2}, \quad |v_{13}| < \sqrt{E_1/E_3}, \\
|v_{12}| &< \sqrt{E_1/E_2}, \quad |v_{23}| < \sqrt{E_2/E_3}, \quad |v_{31}| < \sqrt{E_3/E_1}.
\end{aligned}
\tag{1.26}$$

Використовуючи (1.26) і (1.25) також можна записати

$$v_{21}v_{32}v_{13} < \frac{1 - v_{21}^2 E_1/E_2 - v_{32}^2 E_2/E_3 - v_{13}^2 E_3/E_1}{2} < \frac{1}{2}. \tag{1.27}$$

1.5.4 Визначення механічних властивостей композитних матеріалів

Ключовою особливістю методу механіки матеріалів є те, що необхідно зробити деякі спрощувальні припущення щодо механічної поведінки композитного матеріалу, щоб отримати ефективне рішення [7].

Найбільш суттєвим припущенням є те, що деформації у напрямку волокна односпрямованого волокно-армованого композитного матеріалу однакові як у волокнах, так і у матриці, як показано на рисунку 1.4.

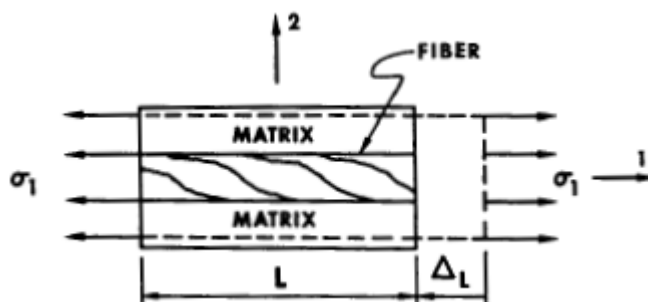


Рисунок 1.4 – Об’ємний елемент композитного матеріалу одновісно навантажений у напрямку армувального волокна

Якщо б деформації були не однаковими, то мав би місце розрив між волокнами та матрицею. Оскільки деформації як в матриці, так і у волокні однакові, то очевидно, що ділянки, нормальні до осі 1, які були плоскими до того, як вони піддалися навантаженню, лишаються після навантаження плоскими. На цій основі побудовано прогнозування механічної поведінки матеріалів для визначення

ефективних значень ортотропних модулів односпрямованого армованого волокнами композитного матеріалу, а саме E_1 , E_2 , ν_{12} та G_{12} .

Визначення E_1 [7].

Модуль пружності E_1 односпрямованого композиту визначається для напрямку 1, за яким розташовані армувальні волокна (див. рисунок 1.4). Згідно з основним припущенням деформація ε_1 поширюється як на волокно, так і на матрицю і визначається як

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta L}{L}. \quad (1.28)$$

Тоді, якщо обидві складові композита поведуться еластично, напруження у напрямку волокна буде визначатися за формулою

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_1, \quad \sigma_m = E_m \varepsilon_1, \quad (1.29)$$

де індекс f – відноситься до армувального волокна, а індекс m – до матриці.

Середнє напруження σ_1 діє на площі поперечного перерізу A елемента об'єму композита (див. рисунок 1.4). Тоді σ_f діє на площу поперечного перерізу волокон A_f , а σ_m діє на площі поперечного перерізу матриці A_m . Таким чином, результуюча сила, що діє на об'ємний елемент композитного матеріалу в напрямку 1 становить

$$F = \sigma_1 A = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m. \quad (1.30)$$

Підстановкою рівняння (1.29) у рівнянні (1.30) і з врахуванням, що

$$\sigma_1 = E_1 \varepsilon_1, \quad (1.31)$$

отримуємо

$$E_1 = E_f \frac{A_f}{A} + E_m \frac{A_m}{A}. \quad (1.32)$$

Але об'ємні частки волокон і матриць можна записати як

$$V_f = \frac{A_f}{A}, \quad V_m = \frac{A_m}{A}. \quad (1.33)$$

Таким чином,

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m. \quad (1.34)$$

Формула (1.34) дістала назву правила сумішей.

Визначення ν_{12} [7].

У разі навантаження зразка композиту за рисунком 1.4 для визначення коефіцієнта Пуассона ν_{12} можна скористатися формулою аналогічною (1.34)

$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m V_m. \quad (1.35)$$

Визначення E_2 [7].

Розглянемо визначення ефективного модуля пружності E_2 композитного матеріалу в напрямку, поперечному волокнам. Випадок, коли напруження, що діє на елемент композиту, має поперечний напрямок до армувальних волокон наведено на рисунку 1.5.

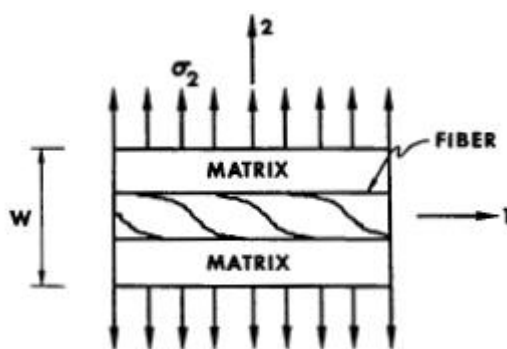


Рисунок 1.5 – Об'ємний елемент композитного матеріалу одновісно навантажений у поперечному напрямку до армувального волокна

В цьому випадку деформації волокна та матриці визначаються через напруження σ_2 :

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_2}{E_f}, \quad \varepsilon_m = \frac{\sigma_2}{E_m}. \quad (1.36)$$

Визначимо повну поперечну деформацію зразка

$$\Delta W = \varepsilon_2 W = V_f W \varepsilon_f + V_m W \varepsilon_m, \quad (1.37)$$

або

$$\varepsilon_2 = V_f \varepsilon_f + V_m \varepsilon_m. \quad (1.38)$$

Після підстановки (1.36) в (1.38) отримуємо

$$\varepsilon_2 = V_f \frac{\sigma_2}{E_f} + V_m \frac{\sigma_2}{E_m}, \quad (1.39)$$

на підставі якого можна записати співвідношення напруження – деформація

$$\sigma_2 = E_2 \varepsilon_2 = E_2 \left[V_f \frac{\sigma_2}{E_f} + V_m \frac{\sigma_2}{E_m} \right]. \quad (1.40)$$

В результаті для визначення E_2 отримуємо такий вираз

$$E_2 = \frac{E_f E_m}{V_m E_f + V_f E_m}. \quad (1.41)$$

Визначення G_{12} [7].

Для визначення модуля зсуву G_{12} можна скористатися формулою аналогічною
(1.41)

$$G_{12} = \frac{G_f G_m}{V_m G_f + V_f G_m}. \quad (1.42)$$

1.6 Теоретичне прогнозування механічної поведінки полімерів армованих волокнами природного походження

За нинішнього сценарію розвитку суспільства звичайні конструкційні матеріали на основі металів все більше замінюються полімерами армованими волокнами, зокрема, природними, завдяки своїм чудовим механічним й фізичним властивостям [7, 16].

Полімерний композитний матеріал з армованим волокном складається з волокон високої міцності, зв'язаних з полімерною матрицею. До широко використовуваних високоміцних волокон можна віднести кевлар, скло та вуглець. Однак, натуральні волокна, як замітники існуючих, останнім часом викликали інтерес у дослідників через властиві їм переваги перед іншими армувальними матеріалами полімерів. Ця зміна пріоритетів перш за все пов'язана з серйозними недоліками існуючих синтетичних волокон, таких як висока вартість, абразивність та небезпека для довкілля. Значні переваги за властивостями, що притаманні натуральним волокнам (низька вартість й густина, специфічні механічні властивості, зменшення споживання енергії, секвестрація CO₂ та біодеструктивність), зробили їх життєздатною альтернативою для існуючих синтетичних волокон [17–21].

До широкодоступних природних волокон відносяться: абака, бамбук, банан, кокос, бавовна, льон, конопля, джут, кенаф, сизаль, пальма тощо [21]. Серед вищезгаданих волокон найбільш часто використовуваними волокнами є джут, льон та сизаль. Натуральні волокна виявляють вищий питомий модуль пружності, ніж синтетичні волокна, такі як кевлар 49, скло та вуглець. Полімерні композитні матеріали, що армуються волокнами, використовуються у різних областях застосування, де зниження ваги є найвищим пріоритетом [16].

До складу натуральних волокон входять целюлоза, геміцелюлоза, пектин та лігнін. Целюлоза – це кристалічна структура, яку можна згрупувати в мікропластики із забезпеченням достатньої стійкості. Висока міцність на стискання натурального волокна пов'язана із наявністю Н-зв'язків у молекулах целюлози [21–23].

Натуральне волокно, як правило, згруповано за трьома категоріями: насіннєве волосся, луб'яні волокна та листові волокна. Природні волокна отримують з пальм, бавовни, льону, коноплі тощо. Наприклад, бавовняне волокно має високу здатність до поглинання вологи та є гарним провідником теплоти. Бавовняне волокно порівняно іншими натуральними волокнами має найнижчі показники міцності [21].

Кокосове волокно, як правило, витягується з лушпиння кокосового фрукта. Кокосові волокна у сухих умовах забезпечують найкращу адгезію з термореактивними і термопластичними смолами. Полімерні композитні матеріали армовані кокосовими волокнами знаходять багато застосувань, таких як автомобільний інтер'єр, панелі та покрівельні матеріали, поштові скриньки, пакувальний матеріал, захисні шоломи тощо [24–26].

Стовбурові волокна, як правило, отримуються з рослинних стебелів і характеризуються великою довжиною. До стовбурових волокон відносяться джут, льон, рамі і конопля. Джутові волокна мають такі характеристики, як високу міцність за малої густини, хорошу ізоляційну властивість, ідентичну дереву. Льняне та конопляне волокна характеризуються високою міцністю, зносостійкістю та довговічністю, але їхні властивості погіршуються під дією сонячного світла.

У праці [21] виконано прогнозування впливу різних класів натуральних волокон за різного значення об'ємної частки (10%, 20%, 30% та 40%) на властивості армованої вінілової ефірної смоли (vinyl ester) за допомогою аналітичних співвідношень [7] та моделювання за допомогою програмного продукту ANSYS Mechanical APDL [15]. Використовуючи аналітичний підхід та числове моделювання в [21] визначено механічні властивості композитів, такі як міцність на розрив, модуль пружності, жорсткість та ударну в'язкість композицій вінілового ефіру, армованих різними натуральними волокнами, і отримані значення порівняно зі значеннями для чистої матриці.

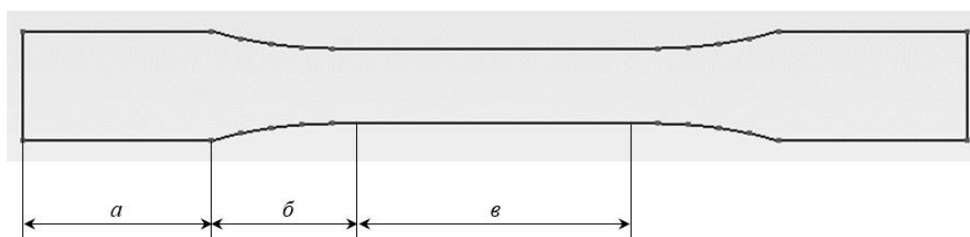
За звичай механічні властивості полімерів досліджуються експериментально згідно ASTM D638 [27]. Під час цих одновісних випробувань визначаються, окрім технічних (модуля пружності E і коефіцієнта Пуассона ν), такі важливі механічні

властивості як: σ_{ult} – міцність на розрив (Па); U_T – жорсткість (Дж/м³); G_C – ударна в'язкість (Дж/м²).

Міцність на розрив матеріалу зразка визначається за даними експерименту

$$\sigma_{ult} = \frac{F_{ult}}{A}, \quad (1.43)$$

де F_{ult} – розривне зусилля, Н; A – площа поперечного січення зразка в робочій зоні (рисунок 1.6), м².



a – зона навантаження; b – перехідна зона; c – робоча зона

Рисунок 1.6 – Зразок полімерного композиту для випробування за ASTM D638

Жорсткість матеріалу зразка визначається за формулою

$$U_T = \sigma_1 \varepsilon_1, \quad (1.44)$$

де $\sigma_1 = \sigma_{ult}$ – напруження під час одновісного випробування, Па; ε_1 – деформація під час одновісного випробування.

Ударна в'язкість матеріалу зразка визначається за формулою

$$G_c = \frac{U_T V}{A}, \quad (1.45)$$

де V – об'єм робочої зони зразка, м³.

Для проведення експериментальних досліджень необхідно мати як дослідні зразки полімерних композитів, так і відповідне експериментальне обладнання, що обумовлює певні матеріальні витрати. В деякій мірі можна цього уникнення, якщо

для визначення механічних властивостей композитів, особливо на етапі їх розробки, скористатися аналітичними співвідношеннями та числовим моделюванням.

В [21] для безперервного односпрямованого композитного полімеру механічні властивості спочатку визначалися за аналітичними залежностями типу (1.34):

- міцність на розрив композиту

$$(\sigma_c)^T = (\sigma_f)_{ult} V_f + (\sigma_m)_{ult} V_m, \quad (1.46)$$

- пружний модуль розтягу-стискання композиту

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m, \quad (1.47)$$

- гранично допустима деформація волокна

$$(\varepsilon_f)_{ult} = \frac{(\sigma_f)_{ult}}{E_f}, \quad (1.48)$$

- гранично допустима деформація матриці

$$(\varepsilon_m)_{ult} = \frac{(\sigma_m)_{ult}}{E_m}, \quad (1.49)$$

- гранично допустима деформація композиту

$$(\varepsilon_c)^T = (\varepsilon_f)_{ult} V_f + (\varepsilon_m)_{ult} V_m, \quad (1.50)$$

- жорсткість композиту

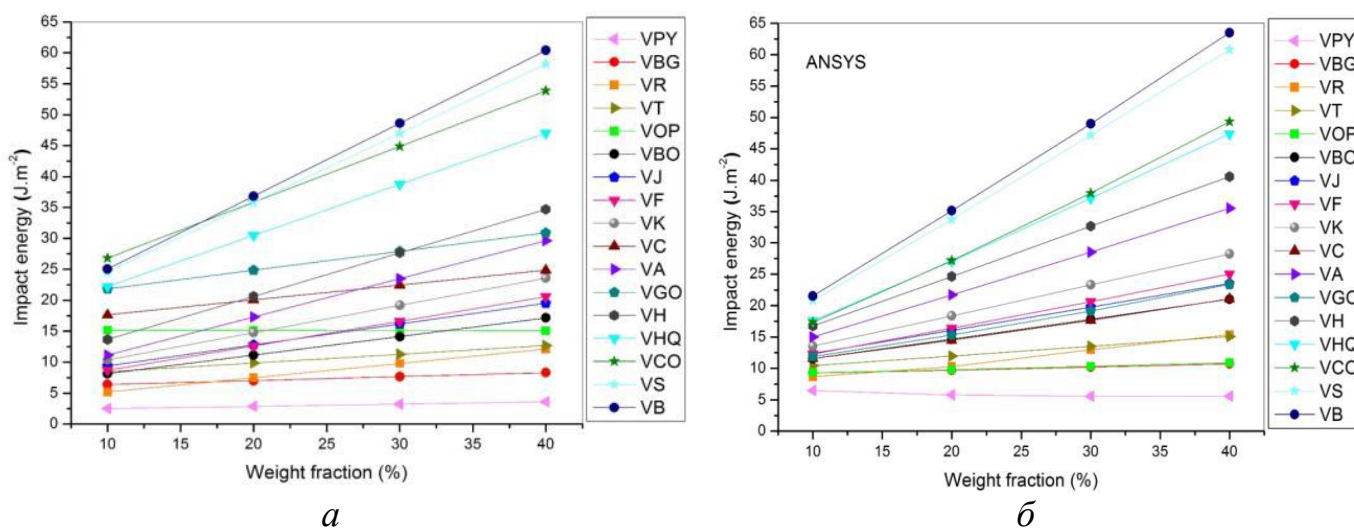
$$U_T = (\sigma_c)^T (\varepsilon_c)^T, \quad (1.51)$$

- ударна в'язкість композиту визначається за (1.45).

В [21] результати, розраховані за аналітичними співвідношеннями, порівнюються з даними симуляції ANSYS для композицій вінілового ефіру,

армованих різними об'ємними фракціями волокон (10%, 20%, 30% та 40%) (рисунок 1.7).

Теоретичні дослідження виконані в [21] показали, що включення більш високої частки фракції клітковини в матрицю із вініловим ефіром призводить до поліпшення механічних властивостей композиту порівняно з чистим матеріалом. Включення волокон абаки, коноплі та банана за різних навантажень у поліефірні полімери значно підвищує міцність на стискання цих композитів. Якщо використовувати аналітичні залежності, то 40 % частка волокна абаки в смолі вінілового ефіру призводить до підвищення міцності на розтягнення, а саме до 436 МПа (збільшення на 497% порівняно з чистою матрицею). За результатами симуляції ANSYS значення міцності на розрив становить 468 МПа (збільшення на 541 % порівняно з чистою матрицею) для такої ж частки волокна абаки.



a – розрахунки за аналітичними співвідношеннями; *б* – числовий аналіз з використанням ANSYS Mechanical APDL

Рисунок 1.7 – Залежність ударної в'язкості вініла армованого природними волокнами залежно від їх об'ємної частки

Додавання 40 % вмісту бананового волокна в матрицю вінілового ефіру показує максимальну жорсткість 1208,19 Дж/м³ та ударну в'язкість 60,41 Дж/м² з використанням аналітичних залежностей та симуляції ANSYS, яка демонструє максимальну жорсткість 1270,39 Дж/м³ та ударну в'язкість 63,52 Дж/м².

Висновки до розділу 1 і завдання досліджень

У результаті аналізу науково-технічної літератури, сучасного стану питання розробки та дослідження механічних властивостей полімерних матеріалів, армованих природними волокнами встановлено, що:

- в основу принципу розробки сучасних композиційних матеріалів покладено комплексне вирішення питань вибору композиційних матеріалів, проектування з них конструкцій та розробки відповідних технологічних процесів;
- наразі єдиної загальновизнаної класифікації композиційних матеріалів не існує, оскільки КМ являють собою самий широкий клас матеріалів, що об'єднує метали, полімери й кераміку. Тому найбільш часто використовується класифікація композиційних матеріалів, в основу якої покладено їх поділ за матеріалознавчими ознаками;
- полімерними матрицями композитних матеріалів можуть слугувати термопластичні полімери, до яких відносяться: поліетилен високого та низького тиску, поліпропілен, полістирол, політетрафторетилен, полівінілхлорид та ін.;
- наповнювачі вводять у полімери з метою створення нових полімерних матеріалів з комплексом цінних експлуатаційних властивостей; поліпшення технологічних властивостей та перероблення наповнених полімерів; здешевлення матеріалів; утилізація відходів та вирішення екологічних задач тощо;
- наповнювачі у вигляді волокон, ниток, джгутів, рублених джгутів використовують для створення конструкційних, високоміцних, високомодульних армованих полімерних матеріалів. Ефективність волокон у пластику зростає зі збільшенням їх довжини. До широкодоступних природних волокон відносяться: абака, бамбук, банан, кокос, бавовна, льон, конопля, джут, кенаф, сизаль, пальма тощо;

- у виробництві полімерних композиційних матеріалів широко використовуються проміжні напівфабрикати у вигляді препрегів. Препрег являє собою напівфабрикат, який зберігається у вигляді рулонів або пакетів, при цьому шари препрега розділяються плівкою;
- полімерні композитні матеріали, армовані волокнами різної природи, відносяться до класу ортотропних матеріалів;
- до механічних властивостей полімерних композитів, які зазвичай визначаються експериментальними методами, окрім технічних (модуля пружності і коефіцієнта Пуассона) також відносяться такі: міцність на розрив композиту, жорсткість і ударна в'язкість;
- однак для проведення експериментальних досліджень необхідно мати як дослідні зразки полімерних композитів, так і відповідне експериментальне обладнання, що обумовлює певні матеріальні витрати. В деякій мірі можна цього уникнення, якщо для визначення механічних властивостей композитів, особливо на етапі їх розробки, скористатися аналітичними співвідношеннями та числовим моделюванням;
- кількість наукових праць, присвячених розробці та дослідженню полімерів, армованих природними волокнами та їх застосуванню у пакувальній галузі є недостатньою.

Проведений аналіз літературних джерел показав актуальність досліджень механічних властивостей композитних полімерних матеріалів, армованих природними волокнами, та їх застосування у пакувальній галузі, що дає можливість підвищити міцність упаковки і зменшити техногенний вплив на навколишнє середовище за рахунок використання відновлювальної сировини (волокна) та її здатності до природного розкладання після використання.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі завдання:

- 1) Проаналізувати сучасний стан питання розробки та дослідження механічних властивостей пакувальних полімерних матеріалів, армованих природними волокнами.

- 2) Сформулювати математичні моделі задач напружено-деформованого стану (НДС) під час випробування зразків армованих полімерів у наближеннях ізотропного та ортотропного середовищ.
 - 3) Визначити ефективні механічні властивості (модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, границю міцності, жорсткість та ударну в'язкість) композитних полімерних матеріалів для ізотропного та ортотропного наближень у разі односпрямованої орієнтації армувального волокна залежно від матеріалів матриці й волокна та його об'ємного вмісту за аналітичними формулами. З використанням границі міцності отримати значення силових навантажень під час розтягу зразків композиційного полімерного матеріалу.
 - 4) Розробити числову методику та програмне забезпечення (ПЗ) для розв'язання задач НДС на базі методу скінченних елементів (МСЕ) в наближеннях ізотропного та ортотропного середовищ. Виконати верифікацію розробленого ПЗ – дослідити точність і збіжність числових розв'язків.
 - 5) Виконати числові експерименти НДС зразків армованих полімерів для визначення ефективних механічних властивостей (модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, границю міцності, жорсткість та ударну в'язкість) залежно від матеріалів матриці і волокна та його об'ємного вмісту. Зіставити отримані механічні властивості з відповідними властивостями, розрахованими за аналітичними залежностями.
 - 6) Розробити числову модель полімерної тари та виконати числовий аналіз її міцності для випадку армованого полімеру та порівняти з результатами, отриманими для звичайного полімерного матеріалу.
 - 7) Розробити рекомендації щодо впровадження армованих полімерів з використанням волокна природного походження в пакувальній індустрії.
- За матеріалами розділу 1 опубліковано 1 статтю у фаховому журналі України.

2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ АРМОВАНИХ ПОЛІМЕРІВ

2.1 Постановка задачі для ізотропного середовища

Система стаціонарних диференціальних рівнянь задачі напружено-деформовано стану під час випробування армованого полімеру з ізотропними властивостями включає рівняння руху й рівноваги, геометричне рівняння – тензор малих деформацій та фізичне рівняння – узагальнений закон Гука [28]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \hat{\boldsymbol{\sigma}} + \rho \mathbf{b} = 0; \\ \hat{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{1}{2}(\mathbf{u}\nabla + \nabla\mathbf{u}); \\ \hat{\boldsymbol{\sigma}} = \frac{E_{\text{comp}}}{1 + \nu_{\text{comp}}} \left(\hat{\boldsymbol{\varepsilon}} + \frac{\nu_{\text{comp}}}{1 - 2\nu_{\text{comp}}} \hat{\mathbf{I}} \text{tr}(\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}) \right), \end{array} \right. \quad (2.1)$$

де ∇ – оператор Гамільтона, м^{-1} ; (\cdot) – оператор скалярного добутку тензорів; $\hat{\boldsymbol{\sigma}}$ – симетричний тензор напруження другого рангу, Па; ρ – густина, $\text{кг}/\text{м}^3$; \mathbf{b} – вектор масових сил, наприклад, гравітаційних, $\text{Н}/\text{кг}$; $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}$ – симетричний тензор другого рангу пружних деформацій; \mathbf{u} – вектор переміщень, м; E_{comp} – модуль пружності композитного полімеру з ізотропними властивостями, Па; ν_{comp} – коефіцієнт Пуассона композитного полімеру з ізотропними властивостями; $\hat{\mathbf{I}}$ – одиничний тензор другого рангу; $\text{tr}(\cdot)$ – оператор сліду тензора.

Граничні умови для (2.1):

- переміщення або защемлення (повинно бути задано хоча б в одній точці на поверхні тіла)

$$\mathbf{u}|_{S_u} = 0, \quad (2.2)$$

де S_u – площа поверхні (або точка поверхні), на якій задано переміщення, м²;

– вектор зовнішньої сили

$$(\hat{\boldsymbol{\sigma}} \cdot \mathbf{n})S_F|_{S_F} = \mathbf{F}, \quad (2.3)$$

де \mathbf{n} – вектор зовнішньої нормалі до поверхні тіла; \mathbf{F} – вектор зовнішньої сили, Н;

S_F – площа поверхні, до якої прикладено силове навантаження, м²;

– зовнішній тиск

$$(\hat{\boldsymbol{\sigma}} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n}|_{S_p} = p \text{ або } (\sigma_{ij}n_j)n_i|_{S_p} = p, \quad (2.4)$$

де p – зовнішній тиск, який задано на поверхні S_p , Па.

2.2 Постановка задачі для ортотропного середовища

Система стаціонарних диференціальних рівнянь задачі напружено-деформовано стану під час випробування армованого полімеру з анізотропними (ототропними) властивостями включає рівняння руху й рівноваги, геометричне рівняння – тензор малих деформацій та фізичне рівняння – закон Гука:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \hat{\boldsymbol{\sigma}} + \rho \mathbf{b} = 0; \\ \hat{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{1}{2}(\mathbf{u}\nabla + \nabla\mathbf{u}); \\ \hat{\boldsymbol{\sigma}} = \hat{\mathbf{C}}^4 : \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}, \end{cases} \quad (2.5)$$

де ∇ – оператор Гамільтона, м^{-1} ; (\cdot) – оператор скалярного добутку тензорів; $\hat{\sigma}$ – симетричний тензор напруження другого рангу, Па; ρ – густина, кг/м^3 ; \mathbf{b} – вектор масових сил, наприклад, гравітаційних, Н/кг ; $\hat{\epsilon}$ – симетричний тензор другого рангу пружних деформацій; \mathbf{u} – вектор переміщень, м; $\hat{\hat{C}}$ – тензор четвертого рангу пружних констант армованого полімеру з ортотропними властивостями, Па; $(:)$ – оператор подвійного скалярного добутку тензорів.

Граничні умови для (2.5) включають умови (2.2)–(2.4).

У загальному випадку закон Гука для анізотропних (ортотропних) матеріалів, який встановлює зв'язок між тензором напруження другого рангу σ_{ij} і тензором деформацій другого рангу ϵ_{kl} в тензорній формі запису має вигляд [29]

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl}, \quad (2.6)$$

де C_{ijkl} , $i, j, k, l = 1, 2, 3$ – декартовий тензор четвертого рангу пружних властивостей матеріалу, Па.

З врахуванням симетрії тензорів σ_{ij} і ϵ_{kl} та переходу на векторне (одноіндексне) представлення тензорів $\sigma_i, i = \overline{1,6}$, $\epsilon_j, j = \overline{1,6}$ закон Гука (2.6) набуває вигляду [28]

$$\sigma_i = D_{ij} \epsilon_j, \quad ij = \overline{1,6}, \quad (2.7)$$

де D_{ij} – декартовий тензор другого рангу пружних властивостей матеріалу, який можна записати у матричному вигляді $[D]$, Па.

Зазвичай Для спрощення форми запису D_{ij} в явному вигляді, зазвичай замість $[D]$ використовують обернену матрицю $[D]^{-1}$, яка називається матрицею піддатливості матеріалу і для ортотропного матеріалу має вигляд [7, 15]

$$[D]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_3} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_{12})}{E_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_{23})}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_{13})}{E_3} \end{bmatrix}. \quad (2.8)$$

Використовуючи (2.8) для визначення матриці жорсткості $[D]$ нескладно скористатися процедурою обернення матриці вигляду

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_3} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_{12})}{E_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_{23})}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_{13})}{E_3} \end{bmatrix}^{-1}. \quad (2.9)$$

2.3 Алгоритми розв'язання задач

2.3.1 Ізотропне наближення

Алгоритм розв'язання задачі для армованого полімеру з ізотропними властивостями може бути таким [30]:

- 1) Визначаємо ефективні механічні властивості композиту (полімер, армований волокном) за такими формулами [7, 15, 21]:

$$[\sigma_{TS}]_{\text{comp}} = [\sigma_{TS}]_f V_f + [\sigma_{TS}]_m V_m - \text{границя міцності композиту}; \quad (2.10)$$

$$E_{\text{comp}} = E_f V_f + E_m V_m - \text{модуль пружності композиту}; \quad (2.11)$$

$$\nu_{\text{comp}} = \nu_f V_f + \nu_m V_m - \text{коефіцієнт Пуассона}; \quad (2.12)$$

$$U_T = [\sigma_{TS}]_{\text{comp}} \varepsilon_{\text{comp}}^T - \text{ударна жорсткість композиту}; \quad (2.13)$$

$$G_{\text{is}} = \frac{U_T V}{A} - \text{ударна в'язкість композиту}, \quad (2.14)$$

де $[\sigma_{TS}]_{\text{comp}}$ – границя міцності композиту, Па; $[\sigma_{TS}]_f$, $[\sigma_{TS}]_m$ – границя міцності волокна і матриці (полімеру), відповідно, Па; V_f , V_m – об'ємні частки волокна і матриці, відповідно; $\varepsilon_{\text{comp}}^T = \frac{[\sigma_{TS}]_{\text{comp}}}{E_{\text{comp}}}$ – гранично

допустима деформація композиту; A – площа поперечного перерізу робочої зони експериментального зразка композиту (див. рисунок 1.6), м²; V – об'єм робочої зони експериментального зразка композиту, м³.

- 2) Визначаємо силове навантаження F (Н) для розтягу зразка з композиційного матеріалу з використанням формул:

$$\sigma = \frac{F}{A}, \text{ звідки визначаємо } F = [\sigma_{TS}]_{\text{comp}} A, \quad (2.15)$$

де $\sigma = [\sigma_{TS}]_{\text{comp}}$ за формулою (2.10), Па; A – площа поперечного перерізу робочої зони експериментального зразка композиту (див. рисунок 1.6), м².

- 3) Виконуємо розрахунки напружено-деформованого стану (НДС) зразка композиту з властивостями (2.10)–(2.12) і навантаженням (2.15). Знаходимо поля еквівалентного напруження σ_{eqM} і деформації ε_{eqM} за Мізесом:

$$\sigma_{eqM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2)}; \quad (2.16)$$

$$\varepsilon_{eqM} = \frac{1}{\sqrt{2}(1 + \nu_{comp})} \sqrt{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})^2 + (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})^2 + \frac{3}{2}(\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{13}^2 + \varepsilon_{23}^2)}; \quad (2.17)$$

- 4) За даними розрахунків НДС для випадку одновісного силового навантаження експериментального зразка полімерного композиту визначаємо його ефективні механічні властивості за формулами, які використовуються під час експериментальних досліджень:

$$E_{comp}^p = \frac{\sigma_{11}}{\varepsilon_{11}} - \text{модуль пружності композиту};$$

$$\nu_{comp}^p = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}} - \text{коефіцієнт Пуассона};$$

$$U_T^p = \sigma_{11}\varepsilon_{11} \text{ або } U_T^p = \sigma_{eqM}\varepsilon_{eqM} - \text{ударна жорсткість композиту};$$

$$G_{IS}^p = \frac{U_T^p V}{A} - \text{ударна в'язкість композиту},$$

де σ_{11} , ε_{11} , ε_{22} – визначаються за результатами розрахунків НДС в перерізі по середині робочої зони зразка композиту (див. рисунок 1.6).

- 5) Будуємо графіки $[\sigma_{TS}]_{comp}$, E_{comp} , ν_{comp} , U_T і G_{IS} за різних значень V_f , розрахованими за аналітичними співвідношеннями (2.10)–(2.14) та виконуємо зіставлення з відповідними механічними властивостями композиту ($E_{comp}^p, \nu_{comp}^p, U_T^p, G_{IS}^p$), що отримані з використанням розрахунків

НДС для випадку одновісного силового навантаження експериментального зразка.

2.3.2 Ортотропне наближення

Припустимо, що армувальні волокна в композитному полімері спрямовані по осі OX (рисунок 2.1). Кожен із компонентів полімерного композита – полімер і волокно проявляють властивості ізотропного пружного матеріалу.

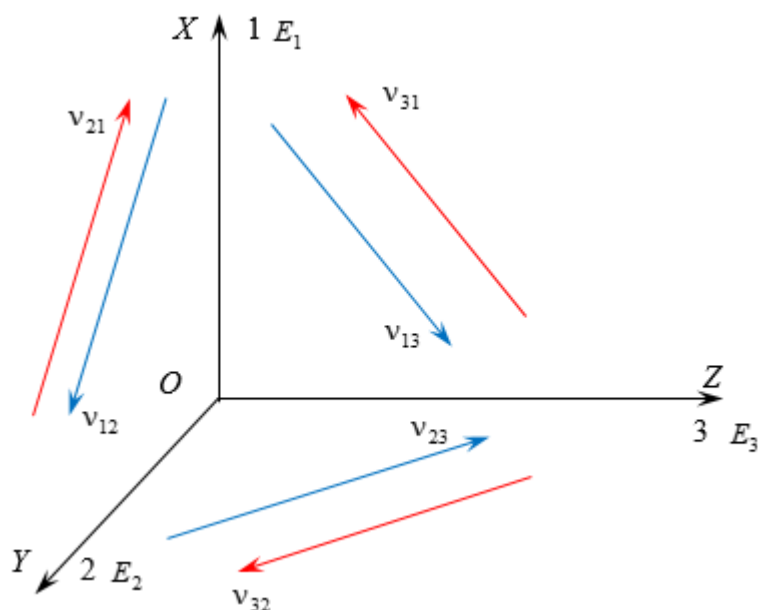


Рисунок 2.1 – До визначення компонент вектора модуля пружності та тензора коефіцієнтів Пуассона

Тоді алгоритм розв'язання задачі під час випробування армованого полімеру може бути таким:

- 1) Визначаємо ефективні механічні властивості композиту (полімер армований волокном) в ортотропному наближенні за такими формулами [7, 15]:
 - компоненти вектора границі міцності композиту

$$\left\{ \begin{array}{l} [\sigma_{TS}]_1 = [\sigma_{TS}]_f V_f + [\sigma_{TS}]_m V_m; \\ \frac{1}{[\sigma_{TS}]_2} = \frac{V_f}{[\sigma_{TS}]_f} + \frac{V_m}{[\sigma_{TS}]_m} \rightarrow [\sigma_{TS}]_2 = [\sigma_{TS}]_3 = \frac{[\sigma_{TS}]_f [\sigma_{TS}]_m}{[\sigma_{TS}]_f V_m + [\sigma_{TS}]_m V_f}; \end{array} \right. \quad (2.18)$$

- компоненти вектора модуля пружності композиту

$$\begin{cases} E_1 = E_f V_f + E_m V_m; \\ \frac{1}{E_2} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \rightarrow E_2 = E_3 = \frac{E_f E_m}{E_f V_m + E_m V_f}; \end{cases} \quad (2.19)$$

- компоненти тензора коефіцієнтів Пуассона композиту

$$\begin{cases} \nu_{12} = \nu_{13} = \nu_f V_f + \nu_m V_m; \\ \frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2} \rightarrow \nu_{21} = \nu_{31} = \frac{E_2 \nu_{12}}{E_1}; \\ \frac{1}{\nu_{23}} = \frac{V_f}{\nu_f} + \frac{V_m}{\nu_m} \rightarrow \nu_{23} = \nu_{32} = \frac{\nu_f \nu_m}{\nu_f V_m + \nu_m V_f}, \end{cases} \quad (2.20)$$

- ударна жорсткість композиту в напрямку осі $OX(1)$

$$U_T = [\sigma_{TS}]_1 \varepsilon_1^T; \quad (2.21)$$

- ударна в'язкість композиту в напрямку осі $OX(1)$

$$G_{IS} = \frac{U_T V}{A}, \quad (2.22)$$

де $[\sigma_{TS}]_i, i=1,2,3$ – компоненти вектора границі міцності ортотропного композиту, Па; $[\sigma_{TS}]_f, [\sigma_{TS}]_m$ – границя міцності волокна і матриці (полімеру), відповідно, Па; $E_i, i=1,2,3$ – компоненти вектора модуля пружності ортотропного композиту, Па; E_f, E_m – модуль пружності волокна і матриці, відповідно, Па; V_f, V_m – об'ємні частки волокна і матриці, відповідно;

$\varepsilon_1^T = \frac{[\sigma_{TS}]_1}{E_1}$ – гранично допустима деформація композиту; A – площа

поперечного перерізу робочої зони експериментального зразка композиту (див. рисунок 1.6), m^2 ; V – об'єм робочої зони експериментального зразка композиту, m^3 .

- 2) Визначаємо силове навантаження F (Н) для розтягу в напрямку осі OX зразка композиційного матеріалу з використанням формул:

$$\sigma = \frac{F}{A}, \text{ звідки } F = [\sigma_{TS}]_I A, \quad (2.23)$$

де $\sigma = [\sigma_{TS}]_I$ за формулою (2.18), Па; A – площа поперечного перерізу зразка композиту в зоні максимального напруження, m^2 .

- 3) Виконуємо розрахунки НДС зразка композиту з властивостями (2.18)–(2.20) і навантаженням (2.23). Знаходимо поля еквівалентного напруження σ_{eqM} і деформації ε_{eqM} за Мізесом:

$$\sigma_{eqM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2)}; \quad (2.24)$$

$$\varepsilon_{eqM} = \frac{1}{\sqrt{2}(1 + \bar{\nu})} \sqrt{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})^2 + (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})^2 + \frac{3}{2}(\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{13}^2 + \varepsilon_{23}^2)}, \quad (2.25)$$

де $\frac{1}{\bar{\nu}} = \frac{1}{\nu_{12}} + \frac{1}{\nu_{21}}$ – ефективний коефіцієнт Пуассона.

- 4) За даними розрахунків НДС для випадку одновісного силового навантаження експериментального зразка полімерного композиту визначаємо його ефективні механічні властивості в напрямку осі OX за формулами, які використовуються під час експериментальних досліджень:

$$E_1^p = \frac{\sigma_{11}}{\varepsilon_{11}} - \text{модуль пружності композиту в напрямку осі 1};$$

$$\nu_{12}^p = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}}, \quad \nu_{13}^p = -\frac{\varepsilon_{33}}{\varepsilon_{11}} - \text{коефіцієнти Пуассона};$$

$$U_T^p = \sigma_{11}\varepsilon_{11} \text{ або } U_T^p = \sigma_{eqM}\varepsilon_{eqM} - \text{ударна жорсткість композиту};$$

$$G_{IS}^p = \frac{U_T^p V}{A} - \text{ударна в'язкість композиту},$$

де σ_{11} , ε_{11} , ε_{22} , ε_{33} – визначаються за результатами розрахунків НДС в перерізі по середині робочої зони зразка композиту (див. рисунок 1.6).

5) Будуємо графіки $[\sigma_{TS}]_i, i = \overline{1,3}$, $E_i, i = \overline{1,3}$, $v_{i,j}, i, j = \overline{1,3}, i \neq j$, U_T і G_{IS} за різних значень V_f , розрахованими за аналітичними співвідношеннями (2.18)–(2.22) та виконуємо зіставлення з відповідними механічними властивостями композиту для напрямку осі 1 $(E_1^p, v_{12}^p, v_{13}^p, U_T^p, G_{IS}^p)$, що отримані з використанням розрахунків НДС для випадку одновісного силового навантаження експериментального зразка.

Для визначення решти ефективних механічних властивостей ортотропного композиту необхідно виконати розрахунки НДС зразка орієнтованого за напрямком осі 2 з силовим навантаженням $F = [\sigma_{TS}]_2 A$, за результатами яких отримати відповідні значення $(E_2^p, E_3^p, v_{21}^p, v_{23}^p, v_{31}^p, U_T^p, G_{IS}^p)$.

2.4 Методики числового розв'язання задач на базі методу скінченних елементів

У результаті мінімізації потенціальної енергії пружного тіла [30–33]

$$\left[\frac{1}{2} \int_V \{\varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon\} dV - \int_V \{\varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon_0\} dV + \int_V \{\varepsilon\}^T \{\sigma_0\} dV \right] - \left[\{u\}^T \{P\} + \int_V d\{f\}^T \{G\} dV + \int_S d\{f\}^T \{p\} dS \right] = \chi \quad (2.26)$$

отримуємо інтегральні співвідношення методу скінченних елементів (МСЕ), що входять у систему дискретних рівнянь, які для одного скінченного елемента (СЕ) мають вигляд:

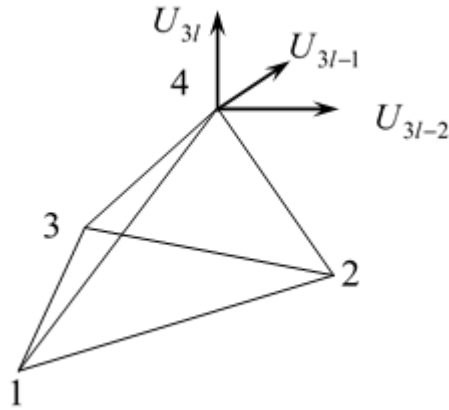
$$[k^{(e)}]\{U\} = \{f^{(e)}\}, \quad (2.27)$$

$$[k^{(e)}] = \int_V [B^{(e)}]^T [D^{(e)}] [B^{(e)}] dV, \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned} \{f^{(e)}\} = \int_V [N^{(e)}]^T \begin{Bmatrix} G_x^{(e)} \\ G_y^{(e)} \\ G_z^{(e)} \end{Bmatrix} dV + \int_V [B^{(e)}]^T [D^{(e)}] \{\epsilon_0^{(e)}\} dV - \\ - \int_S [N^{(e)}]^T \begin{Bmatrix} p_x^{(e)} \\ p_y^{(e)} \\ p_z^{(e)} \end{Bmatrix} dS + \{P\}, \end{aligned} \quad (2.29)$$

де $[k^{(e)}]$ – матриця жорсткості СЕ, Н/м; $\{U\}$ – вектор переміщень СЕ, м; $\{f^{(e)}\}$ – вектор вільних членів системи рівнянь, Н; $[B^{(e)}]$ – матриця градієнтів СЕ, яка зв'язує деформації й переміщення, м⁻¹; $[D^{(e)}]$ – матриця механічних властивостей, Па; $\{\epsilon_0^{(e)}\}$ – початкова деформація СЕ, що пов'язана з температурним навантаженням; $[N^{(e)}]$ – матриця функцій форми; $G_x^{(e)} = \rho g_x$, $G_y^{(e)} = \rho g_y$, $G_z^{(e)} = \rho g_z$ – об'ємні сили, Н/м³; $p_x^{(e)}$, $p_y^{(e)}$, $p_z^{(e)}$ – поверхневе навантаження, Н/м²; $\{P\}$ – вектор-стовпець вузлових сил, Н.

Розглянемо отримання основних співвідношень МСЕ для розв'язання тривимірних задач НДС з використанням чотиригранного СЕ [32, 33] (тетраедра) (рисунок 2.2).



$1, 2, 3, 4$ – номери вузлів або i, j, k, l ; $U_{3l}, U_{3l-1}, U_{3l-2}$ – вузлові значення компонент переміщень (тобто для чотирьох вузлів СЕ маємо 12 невідомих)

Рисунок 2.2 – Чотиригранний або тетраедний СЕ

Матриця функцій форми СЕ складається із трьох стовпців, що відповідає трьом складовим переміщень по x , y і z

$$[N^{(e)}]^T = \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 \\ 0 & 0 & N_i \\ N_j & 0 & 0 \\ 0 & N_j & 0 \\ 0 & 0 & N_j \\ N_k & 0 & 0 \\ 0 & N_k & 0 \\ 0 & 0 & N_k \\ N_l & 0 & 0 \\ 0 & N_l & 0 \\ 0 & 0 & N_l \end{bmatrix}, \quad (2.30)$$

де $N_i = \frac{1}{6V} [a_i + b_i x + c_i y + d_i z]$ – функція форми у вузлі СЕ із номером i ;

$$V = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_k & y_k & z_k \\ 1 & x_l & y_l & z_l \end{bmatrix} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_1 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} \text{ – об'єм тетраедра, м}^3; a_i, b_i, c_i, d_i, i = \overline{1,4} \text{ –}$$

коефіцієнти, що знаходяться за такими формулами:

– для індекса $i=1$ (див. рисунок 2.2), маємо

$$\begin{aligned} a_i &= \begin{bmatrix} x_j & y_j & z_j \\ x_k & y_k & z_k \\ x_\ell & y_\ell & z_\ell \end{bmatrix}, & b_i &= - \begin{bmatrix} 1 & y_j & z_j \\ 1 & y_k & z_k \\ 1 & y_\ell & z_\ell \end{bmatrix}, \\ c_i &= - \begin{bmatrix} x_j & 1 & z_j \\ x_k & 1 & z_k \\ x_\ell & 1 & z_\ell \end{bmatrix}, & d_i &= - \begin{bmatrix} x_j & y_j & 1 \\ x_k & y_k & 1 \\ x_\ell & y_\ell & 1 \end{bmatrix}; \end{aligned} \quad (2.31)$$

– для індекса $j=2$, маємо

$$\begin{aligned} a_j &= \begin{bmatrix} x_i & y_i & z_i \\ x_k & y_k & z_k \\ x_\ell & y_\ell & z_\ell \end{bmatrix}, & b_j &= \begin{bmatrix} 1 & y_i & z_i \\ 1 & y_k & z_k \\ 1 & y_\ell & z_\ell \end{bmatrix}, \\ c_j &= \begin{bmatrix} x_i & 1 & z_i \\ x_k & 1 & z_k \\ x_\ell & 1 & z_\ell \end{bmatrix}, & d_j &= \begin{bmatrix} x_i & y_i & 1 \\ x_k & y_k & 1 \\ x_\ell & y_\ell & 1 \end{bmatrix}; \end{aligned} \quad (2.32)$$

– для індекса $k=3$, маємо

$$a_k = \begin{bmatrix} x_i & y_i & z_i \\ x_j & y_j & z_j \\ x_\ell & y_\ell & z_\ell \end{bmatrix}, \quad b_k = - \begin{bmatrix} 1 & y_i & z_i \\ 1 & y_j & z_j \\ 1 & y_\ell & z_\ell \end{bmatrix},$$

$$c_k = - \begin{bmatrix} x_i & 1 & z_i \\ x_j & 1 & z_j \\ x_\ell & 1 & z_\ell \end{bmatrix}, \quad d_k = - \begin{bmatrix} x_i & y_i & 1 \\ x_j & y_j & 1 \\ x_\ell & y_\ell & 1 \end{bmatrix}; \quad (2.33)$$

– для індекса $\ell=4$, маємо

$$\begin{aligned} a_\ell &= \begin{bmatrix} x_i & y_i & z_i \\ x_j & y_j & z_j \\ x_k & y_k & z_k \end{bmatrix}, & b_\ell &= \begin{bmatrix} 1 & y_i & z_i \\ 1 & y_j & z_j \\ 1 & y_k & z_k \end{bmatrix}, \\ c_\ell &= \begin{bmatrix} x_i & 1 & z_i \\ x_j & 1 & z_j \\ x_k & 1 & z_k \end{bmatrix}, & d_\ell &= \begin{bmatrix} x_i & y_i & 1 \\ x_j & y_j & 1 \\ x_k & y_k & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2.34)$$

Три компоненти вектора переміщень u, v, w апроксимуються в середині СЕ співвідношеннями вигляду:

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = [N^{(e)}] \{U\}, \quad (2.35)$$

$$[N^{(e)}] = \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 & N_j & 0 & 0 & N_k & 0 & 0 & N_l & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 & 0 & N_j & 0 & 0 & N_k & 0 & 0 & N_l & 0 \\ 0 & 0 & N_i & 0 & 0 & N_j & 0 & 0 & N_k & 0 & 0 & N_l \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_{3i-2} \\ U_{3i-1} \\ U_{3i} \\ U_{3j-2} \\ U_{3j-1} \\ U_{3j} \\ U_{3k-2} \\ U_{3k-1} \\ U_{3k} \\ U_{3l-2} \\ U_{3l-1} \\ U_{3l} \end{Bmatrix}.$$

Співвідношення між переміщеннями і деформаціями мають вигляд:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}, \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}, \quad \varepsilon_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \quad \varepsilon_{xz} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}.\end{aligned}\quad (2.36)$$

Матрицю градієнтів $[B]$ у формулі $\{\varepsilon\} = [B]\{U\}$ неважко отримати диференціюванням (2.35) з використанням співвідношень (2.36) і виразів для $[N]$. У результаті отримуємо

$$[B] = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} b_i & 0 & 0 & b_j & 0 & 0 & b_k & 0 & 0 & b_l & 0 & 0 \\ 0 & c_i & 0 & 0 & c_j & 0 & 0 & c_k & 0 & 0 & c_l & 0 \\ 0 & 0 & d_i & 0 & 0 & d_j & 0 & 0 & d_k & 0 & 0 & d_l \\ c_i & b_i & 0 & c_j & b_j & 0 & c_k & b_k & 0 & c_l & b_l & 0 \\ 0 & d_i & c_i & 0 & d_j & c_j & 0 & d_k & c_k & 0 & d_l & c_l \\ d_i & 0 & b_i & d_j & 0 & b_j & d_k & 0 & b_k & d_l & 0 & b_l \end{bmatrix}. \quad (2.37)$$

Матриця фізичних констант СЕ для ізотропного матеріалу має вигляд

$$[D] = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix}, \quad (2.38)$$

де E – модуль пружності, Па; ν – коефіцієнт Пуассона.

Вектор сумарних деформацій СЕ визначається співвідношенням:

$$\{\epsilon^{(e)}\} = [B^{(e)}]\{U\},$$

$$\{\epsilon^{(e)}\} = \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{xz} \end{Bmatrix} = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} b_i & 0 & 0 & b_j & 0 & 0 & b_k & 0 & 0 & b_l & 0 & 0 \\ 0 & c_i & 0 & 0 & c_j & 0 & 0 & c_k & 0 & 0 & c_l & 0 \\ 0 & 0 & d_i & 0 & 0 & d_j & 0 & 0 & d_k & 0 & 0 & d_l \\ c_i & b_i & 0 & c_j & b_j & 0 & c_k & b_k & 0 & c_l & b_l & 0 \\ 0 & d_i & c_i & 0 & d_j & c_j & 0 & d_k & c_k & 0 & d_l & c_l \\ d_i & 0 & b_i & d_j & 0 & b_j & d_k & 0 & b_k & d_l & 0 & b_l \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_{3i-2} \\ U_{3i-1} \\ U_{3i} \\ U_{3j-2} \\ U_{3j-1} \\ U_{3j} \\ U_{3k-2} \\ U_{3k-1} \\ U_{3k} \\ U_{3l-2} \\ U_{3l-1} \\ U_{3l} \end{Bmatrix}. \quad (2.39)$$

Вектор початкових деформацій СЕ, що пов'язаний із температурним навантаженням

$$\{\epsilon_0\} = \beta \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad (2.40)$$

де β – коефіцієнт лінійного термічного розширення, K^{-1} .

Внаслідок того, що матриці $[B]$ і $[D]$ містять тільки константи, матриця жорсткості СЕ визначається дуже просто

$$[k^{(e)}] = \int_V [B]^T [D][B] dV = [B]^T [D][B] V, \quad (2.41)$$

де V – об'єм СЕ, m^3 .

Вираз для визначення вектора навантаження СЕ, що пов'язаний із температурним розширенням (другий доданок (2.29)) можна отримати за допомогою аналітичного інтегрування з використанням L -координат [32, 33]

$$\{f_{th}^{(e)}\} = \int_V [B^{(e)}]^T [D^{(e)}] \{\epsilon_0^{(e)}\} dV = \frac{\beta E \Delta T V}{1 - 2\nu} [B]^T \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad (2.42)$$

де E – модуль пружності, Па; ν – коефіцієнт Пуассона; β – коефіцієнт лінійного термічного розширення, K^{-1} .

Формулу для визначення вектора навантаження СЕ, що пов'язаний із зусиллям (тиском, третій доданок (2.29)) на грані СЕ із номером I та з номерами вузлів $1, 2, 3$ (див. рисунок 2.2)), можна отримати за допомогою аналітичного інтегрування з використанням L -координат [32, 33]

$$\begin{aligned} \{f_{p1(123)}^{(e)}\} &= \int_S [N^{(e)}]^T \begin{Bmatrix} p_x^{(e)} \\ p_y^{(e)} \\ p_z^{(e)} \end{Bmatrix} dS = \\ &= \frac{S_1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \begin{Bmatrix} p_1 n_{1x} \\ p_1 n_{1y} \\ p_1 n_{1z} \end{Bmatrix}, \end{aligned} \quad (2.43)$$

де S_1 – площа грані I , m^2 ; p_1 – зусилля (тиск) на грані I , Па; n_{1x}, n_{1y}, n_{1z} – компоненти вектора направляючих косинусів до зовнішньої нормалі грані 1 СЕ.

У (2.43) і далі значення скалярної величини тиску p_1 береться за нормальне зусилля на грані СЕ, тобто $p = |\mathbf{p}_n|$, а його компоненти отримуються через

направляючі косинуси $\mathbf{p}_n = (pn_x, pn_y, pn_z) = pn_x \mathbf{i} + pn_y \mathbf{j} + pn_z \mathbf{k}$, де $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ – одиничні вектори (орти декартової) системи координат.

Вектор навантаження СЕ, що пов'язаний із зусиллям (тиском) на грані СЕ із номером 2 та з номерами вузлів 2,4,3 (див. рисунок 2.2)

$$\{f_{p2(243)}^{(e)}\} = \frac{S_2}{3} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \begin{Bmatrix} p_2 n_{2x} \\ p_2 n_{2y} \\ p_2 n_{2z} \end{Bmatrix}, \quad (2.44)$$

де S_2 – площа грані 2, м²; p_2 – зусилля (тиск) на грані 2, Па; n_{2x}, n_{2y}, n_{2z} – компоненти вектора направляючих косинусів до зовнішньої нормалі грані 2 СЕ.

Вектор навантаження СЕ, що пов'язаний із зусиллям (тиском) на грані СЕ із номером 3 та з номерами вузлів 1,3,4 (див. рисунок 2.2)

$$\{f_{p3(134)}^{(e)}\} = \frac{S_3}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \begin{Bmatrix} p_3 n_{3x} \\ p_3 n_{3y} \\ p_3 n_{3z} \end{Bmatrix}, \quad (2.45)$$

де S_3 – площа грані 3, м²; p_3 – зусилля (тиск) на грані 3, Па; n_{3x}, n_{3y}, n_{3z} – компоненти вектора направляючих косинусів до зовнішньої нормалі грані 3 СЕ.

Вектор навантаження СЕ, що пов'язаний із зусиллям (тиском) на грані СЕ із номером 4 та з номерами вузлів 1,4,2 (див. рисунок 2.2)

$$\{f_{p4(142)}^{(e)}\} = \frac{S_4}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \begin{Bmatrix} p_4 n_{4x} \\ p_4 n_{4y} \\ p_4 n_{4z} \end{Bmatrix}, \quad (2.46)$$

де S_4 – площа грані 4, м²; p_4 – зусилля (тиск) на грані 4, Па; n_{4x}, n_{4y}, n_{4z} – компоненти вектора направляючих косинусів до зовнішньої нормалі грані 4 СЕ.

Площа граней СЕ в (2.43)–(2.46) визначається за формулами [33] (див. рисунок 2.2):

- для грані 1 СЕ із номерами вузлів 1,2,3

$$S_1 = \frac{\sqrt{g_{1(1)}^2 + g_{2(1)}^2 + g_{3(1)}^2}}{2}, \quad (2.47)$$

$$g_{1(1)} = \begin{vmatrix} y_1 - y_3 & z_1 - z_3 \\ y_2 - y_3 & z_2 - z_3 \end{vmatrix}, \quad g_{2(1)} = -\begin{vmatrix} x_1 - x_3 & z_1 - z_3 \\ x_2 - x_3 & z_2 - z_3 \end{vmatrix}, \quad g_{3(1)} = \begin{vmatrix} x_1 - x_3 & y_1 - y_3 \\ x_2 - x_3 & y_2 - y_3 \end{vmatrix},$$

де $x_i, y_i, z_i, i = 1, 2, 3$ – координати вузлів у вершинах грані 1 СЕ;

- для грані 2 СЕ із номерами вузлів 2,4,3

$$S_2 = \frac{\sqrt{g_{1(2)}^2 + g_{2(2)}^2 + g_{3(2)}^2}}{2}, \quad (2.48)$$

$$g_{1(2)} = \begin{vmatrix} y_2 - y_4 & z_2 - z_4 \\ y_3 - y_4 & z_3 - z_4 \end{vmatrix}, \quad g_{2(2)} = -\begin{vmatrix} x_2 - x_4 & z_2 - z_4 \\ x_3 - x_4 & z_3 - z_4 \end{vmatrix}, \quad g_{3(2)} = \begin{vmatrix} x_2 - x_4 & y_2 - y_4 \\ x_3 - x_4 & y_3 - y_4 \end{vmatrix},$$

де $x_i, y_i, z_i, i = 2, 4, 3$ – координати вузлів у вершинах грані 2 СЕ;

- для грані 3 СЕ із номерами вузлів 1,3,4

$$S_3 = \frac{\sqrt{g_{1(3)}^2 + g_{2(3)}^2 + g_{3(3)}^2}}{2}, \quad (2.49)$$

$$g_{1(3)} = \begin{vmatrix} y_3 - y_4 & z_3 - z_4 \\ y_1 - y_4 & z_1 - z_4 \end{vmatrix}, \quad g_{2(3)} = -\begin{vmatrix} x_3 - x_4 & z_3 - z_4 \\ x_1 - x_4 & z_1 - z_4 \end{vmatrix}, \quad g_{3(3)} = \begin{vmatrix} x_3 - x_4 & y_3 - y_4 \\ x_1 - x_4 & y_1 - y_4 \end{vmatrix},$$

де $x_i, y_i, z_i, i = 1, 3, 4$ – координати вузлів у вершинах грані 3 СЕ;

- для грані 4 СЕ із номерами вузлів 1,4,2

$$S_4 = \frac{\sqrt{g_{1(4)}^2 + g_{2(4)}^2 + g_{3(4)}^2}}{2}, \quad (2.50)$$

$$g_{1(4)} = \begin{vmatrix} y_1 - y_4 & z_1 - z_4 \\ y_2 - y_4 & z_2 - z_4 \end{vmatrix}, \quad g_{2(4)} = -\begin{vmatrix} x_1 - x_4 & z_1 - z_4 \\ x_2 - x_4 & z_2 - z_4 \end{vmatrix}, \quad g_{3(4)} = \begin{vmatrix} x_1 - x_4 & y_1 - y_4 \\ x_2 - x_4 & y_2 - y_4 \end{vmatrix},$$

де $x_i, y_i, z_i, i = 1, 4, 2$ – координати вузлів у вершинах грані 4 СЕ.

Напрямні косинуси до граней СЕ в (2.43)–(2.46) визначаються за формулами [33] (див. рисунок 3.2):

– для грані 1 СЕ із номерами вузлів 1, 2, 3

$$n_{1x} = \frac{g_{1(1)}}{2S_1}, \quad n_{1y} = \frac{g_{2(1)}}{2S_1}, \quad n_{1z} = \frac{g_{3(1)}}{2S_1}; \quad (2.51)$$

– для грані 2 СЕ із номерами вузлів 2, 4, 3

$$n_{2x} = \frac{g_{1(2)}}{2S_2}, \quad n_{2y} = \frac{g_{2(2)}}{2S_2}, \quad n_{2z} = \frac{g_{3(2)}}{2S_2}; \quad (2.52)$$

– для грані 3 СЕ із номерами вузлів 1, 3, 4

$$n_{3x} = \frac{g_{1(3)}}{2S_3}, \quad n_{3y} = \frac{g_{2(3)}}{2S_3}, \quad n_{3z} = \frac{g_{3(3)}}{2S_3}; \quad (2.53)$$

– для грані 4 СЕ із номерами вузлів 1, 4, 2

$$n_{4x} = \frac{g_{1(4)}}{2S_4}, \quad n_{4y} = \frac{g_{2(4)}}{2S_4}, \quad n_{4z} = \frac{g_{3(4)}}{2S_4}. \quad (2.54)$$

Вираз для визначення вектора навантаження СЕ, що пов'язаний із об'ємним зусиллям (гравітацією, перший доданок (2.29)), можна отримати за допомогою аналітичного інтегрування з використанням L -координат [32, 33]

$$\begin{aligned} \{f_v^{(e)}\} &= \int_V [N^{(e)}]^T \begin{Bmatrix} \rho g_x \\ \rho g_y \\ \rho g_z \end{Bmatrix} dV = \\ &= \frac{V}{4} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \begin{Bmatrix} \rho g_x \\ \rho g_y \\ \rho g_z \end{Bmatrix}, \end{aligned} \quad (2.55)$$

де V – об'єм СЕ, м^3 ; ρ – густина, кг/м^3 ; g_x, g_y, g_z – компоненти вектора прискорення вільного падіння, м/с^2 .

Наразі, всі співвідношення (2.30)–(2.56) тетраедних СЕ тривимірної задачі НДС є визначеними. Глобальна матриця та вектор вільних членів СЛАР, що стосується всієї розрахункової області, будуються за формулами (2.56)

$$[K] = \sum_{e=1}^E [k^{(e)}], \quad \{F\} = \sum_{e=1}^E \{f^{(e)}\}, \quad (2.56)$$

де E – кількість СЕ, на які розбито розрахункову область у результаті дискретизації.

З урахуванням (2.56) СЛАР можна записати у векторному вигляді

$$[K]\{U\} = \{F\}, \quad (2.57)$$

де $\{U\}$ – вектор невідомих вузлових значень складових переміщень.

За граничних умов Дирихле (або защемлення), коли задані нульові переміщення у вузлах, СЛАР змінюється аналогічно алгоритму наведеному в [32,33].

Після розв'язання СЛАР типу (2.57) отримуємо вузлові значення переміщень або вектор переміщень у глобальних вузлах $\{U\}$, у який входять три їх складові $\{U_x\}, \{U_y\}, \{U_z\}$.

Формування глобальних векторів складових переміщень виконується за формулами

$$U_{xi} = U_{3i-2}; U_{yi} = U_{3i-1}; U_{zi} = U_{3i}, \quad i = \overline{1, N}, \quad (2.58)$$

де N – кількість глобальних вузлів розрахункової області.

Визначення глобального вектору сумарних переміщень

$$U_{sumi} = \sqrt{(U_x)_i^2 + (U_y)_i^2 + (U_z)_i^2}, \quad i = \overline{1, N}, \quad (2.59)$$

Далі виконується обчислення деформацій та напружень в СЕ розрахункової області. Спочатку визначаються температурні деформації в СЕ

$$\{\epsilon_0^{(e)}\}^T = \beta \Delta T \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad (2.60)$$

де індекс (e) означає, що величини відносяться до СЕ, а індекс T – до температурних деформацій.

Далі обчислюються компоненти пружних деформацій СЕ

$$\{\epsilon^{(e)}\}^e = \{\epsilon^{(e)}\} - \{\epsilon_0^{(e)}\}^T = [B^{(e)}] \{U^{(e)}\} - \{\epsilon_0^{(e)}\}^T, \quad (2.61)$$

де $[B^{(e)}]$ – матриця градієнтів СЕ (2.37); $\{U^{(e)}\}$ – вектор складових переміщень СЕ;

$$\{\epsilon^{(e)}\}^e = \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \epsilon_{12} \\ \epsilon_{23} \\ \epsilon_{13} \end{Bmatrix} - \text{вектор (тензор) пружних деформацій СЕ.}$$

Обчислення компонент напружень СЕ виконується за формулою

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon^{(e)}\}^e. \quad (2.62)$$

Визначення компонент деформацій у глобальних вузлах розрахункової області через компоненти деформацій у СЕ

$$\begin{aligned} \epsilon_{xxj} &= \frac{\sum_{e=1}^n \frac{\epsilon_{xxi(j)}^{(e)}}{r_{c-i(j)}}}{\sum_{e=1}^n \frac{1}{r_{c-i(j)}}}; \quad \epsilon_{yyj} = \frac{\sum_{e=1}^n \frac{\epsilon_{yyi(j)}^{(e)}}{r_{c-i(j)}}}{\sum_{e=1}^n \frac{1}{r_{c-i(j)}}}; \quad \epsilon_{zzj} = \frac{\sum_{e=1}^n \frac{\epsilon_{zzi(j)}^{(e)}}{r_{c-i(j)}}}{\sum_{e=1}^n \frac{1}{r_{c-i(j)}}}; \\ \epsilon_{xyj} &= \frac{\sum_{e=1}^n \frac{\epsilon_{xyi(j)}^{(e)}}{r_{c-i(j)}}}{\sum_{e=1}^n \frac{1}{r_{c-i(j)}}}; \quad \epsilon_{yzj} = \frac{\sum_{e=1}^n \frac{\epsilon_{yzi(j)}^{(e)}}{r_{c-i(j)}}}{\sum_{e=1}^n \frac{1}{r_{c-i(j)}}}; \quad \epsilon_{xzz} = \frac{\sum_{e=1}^n \frac{\epsilon_{xzi(j)}^{(e)}}{r_{c-i(j)}}}{\sum_{e=1}^n \frac{1}{r_{c-i(j)}}}; \quad j = \overline{1, N} \end{aligned}, \quad (2.63)$$

де (e) – номер СЕ; n – кількість елементів, що оточують вузол j ; $i(j)$ – функція, яка визначає локальні номери вузлів СЕ через глобальні; $r_{c-i(j)} = \sqrt{(x_{i(j)} - x_c)^2 + (y_{i(j)} - y_c)^2 + (z_{i(j)} - z_c)^2}$ – відстань між центром маси СЕ та вузлом СЕ, м; $x_c = (x_1 + x_2 + x_3 + x_4)/4$, $y_c = (y_1 + y_2 + y_3 + y_4)/4$, $z_c = (z_1 + z_2 + z_3 + z_4)/4$ – координати центра маси СЕ, які визначаються через координати вузлів СЕ, м.

Визначення компонент напружень у глобальних вузлах розрахункової області через компоненти напружень у СЕ

$$\begin{aligned}
\sigma_{xxj} &= \frac{\sum_{e=1}^n \frac{\sigma_{xxi(j)}^{(e)}}{r_{c-i(j)}}}{\sum_{e=1}^n \frac{1}{r_{c-i(j)}}}; \quad \sigma_{yyj} = \frac{\sum_{e=1}^n \frac{\sigma_{yyi(j)}^{(e)}}{r_{c-i(j)}}}{\sum_{e=1}^n \frac{1}{r_{c-i(j)}}}; \quad \sigma_{zzj} = \frac{\sum_{e=1}^n \frac{\sigma_{zzi(j)}^{(e)}}{r_{c-i(j)}}}{\sum_{e=1}^n \frac{1}{r_{c-i(j)}}}; \\
\sigma_{xyj} &= \frac{\sum_{e=1}^n \frac{\sigma_{xyi(j)}^{(e)}}{r_{c-i(j)}}}{\sum_{e=1}^n \frac{1}{r_{c-i(j)}}}; \quad \sigma_{yzj} = \frac{\sum_{e=1}^n \frac{\sigma_{yzi(j)}^{(e)}}{r_{c-i(j)}}}{\sum_{e=1}^n \frac{1}{r_{c-i(j)}}}; \quad \sigma_{xzz} = \frac{\sum_{e=1}^n \frac{\sigma_{xzi(j)}^{(e)}}{r_{c-i(j)}}}{\sum_{e=1}^n \frac{1}{r_{c-i(j)}}}; \quad j = \overline{1, N}
\end{aligned} \quad (2.64)$$

Визначення еквівалентного напруження за Мізесом у глобальних вузлах

$$\sigma_{\text{ekvM}j} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_{xxj} - \sigma_{yyj})^2 + (\sigma_{yyj} - \sigma_{zzj})^2 + (\sigma_{zzj} - \sigma_{xxj})^2 + 6(\sigma_{xyj}^2 + \sigma_{yzj}^2 + \sigma_{xzz}^2)}, \quad (2.65)$$

$$j = \overline{1, N}.$$

Для випадку ортотропного матеріалу матриця фізичних констант СЕ визначається оберненням матриці піддатливості (2.9)

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_3} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_{12})}{E_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_{23})}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_{13})}{E_3} \end{bmatrix}^{-1}. \quad (2.66)$$

У (2.66) вектор модуля пружності визначається за (2.19), а тензор коефіцієнтів Пуассона (2.20).

Висновки до розділу 2

- 1) Сформульовано математичні моделі задач напружено-деформованого стану під час випробування зразків армованих полімерів у наближеннях ізотропного та ортотропного середовищ.
- 2) Розроблено алгоритм визначення ефективних значень механічних характеристик армованих полімерів за допомогою розв'язання задач НДС для композитів з ортотропними властивостями.
- 3) На базі МСЕ розроблено числову методику розв'язання задач НДС в наближеннях ізотропного та ортотропного середовищ.

3 ЧИСЛОВІ МОДЕЛІ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ АРМОВАНИХ ПОЛІМЕРІВ

3.1 Програмне забезпечення та числові моделі

Відомо, що програмне забезпечення для розв'язання задач НДС та, як правило, багатьох інших наукових та інженерних задач включає такі головні етапи:

- 1) Побудова геометрії фізичного об'єкту – розрахункової області та її дискретизація.
- 2) Власне числове розв'язання задачі НДС методом скінченних елементів.
- 3) Візуалізація результатів розрахунків у вигляді фізичних полів та графіків епюр.

Тому в дисертаційній роботі для числового розв'язання задачі НДС (див. розділ 2) використано три окремих програмних продукти: для першого і третього етапів запропоновано використовувати вільно відкриті програмні коди, а для другого – спеціальне ПЗ як середовище для програмування з метою створення програми авторської розробки.

Побудову геометрії фізичного об'єкту (зразка полімерного композиту) та виконання його дискретизації тетраедними скінченними елементами запропоновано здійснювати за допомогою вільно відкритої програми Gmsh [34]. Саме ПЗ Gmsh дістало найбільшого поширення серед вільно відкритих програмних продуктів для автоматичної генерації сіток завдяки своїй доступності та зручності у користуванні. Цей програмний продукт дає змогу будувати прості геометричні моделі фізичних об'єктів, тобто має ознаки CAD-системи, та виконувати генерацію якісних розрахункових сіток.

Для числової реалізації методики розв'язання задач НДС для матеріалів з ізотропними та ортотропними властивостями, що наведена у розділі 2, обрано програмне середовище Mathcad [35]. Вибір мови програмування Mathcad обумовлений перш за все тим, що запис вихідних математичних формулювань

числової методики (див. розділ 2) у програмному коді Mathcad відрізняється найбільшою наочністю порівняно з іншими мовами високого рівня, такими як Fortran, C++ тощо. Це також значно спрощує процедуру розробки ПЗ для розв'язання складних задач механіки твердого деформованого тіла, до яких і відносяться статичні задачі НДС.

Для візуалізації результатів розрахунків застосовано вільно відкритий програмний код ParaView [36].

На першому етапі побудови числової моделі НДС необхідно визначитися з геометрією фізичного об'єкта та виконати його дискретизацію. В дисертації для задання геометричних характеристик зразка композитного полімеру для випробування на розтяг як і в праці [21] прийнято використовувати стандарт ASTM D638 [27] типу I з габаритними розмірами $165 \times 19 \times 3$ мм (рисунок 3.1).

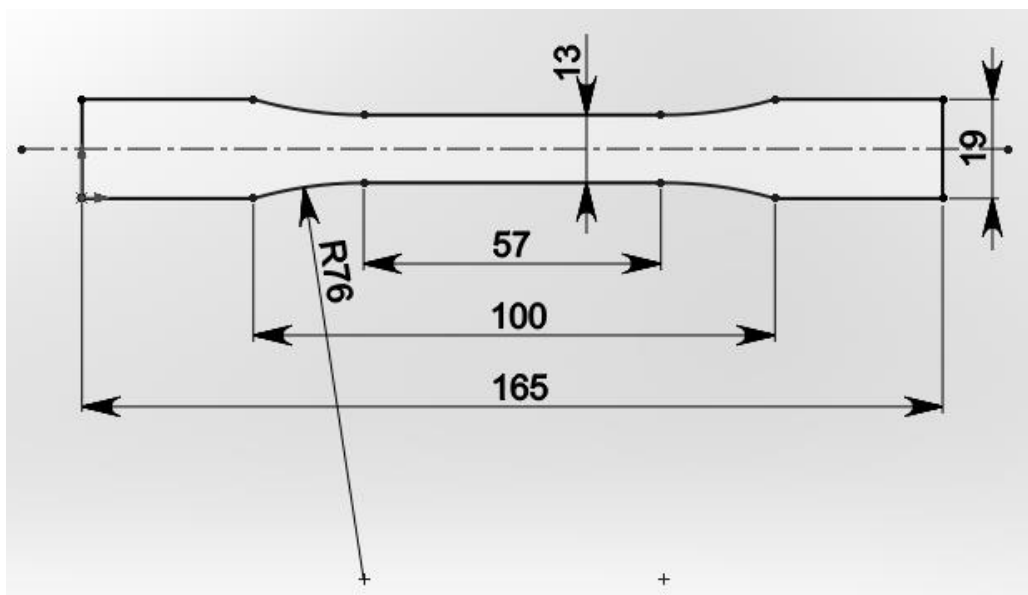


Рисунок 3.1 – Геометричні характеристики зразка композитного полімеру за стандартом ASTM D638 [27] типу I (товщина 3 мм)

Для створення тривимірної моделі зразка за рисунком 3.1 використано ПЗ Gmsh та відповідний файл **ASTMD638_type_I.geo**, написаний на мові програмування C (Додаток А).

Результат побудови тривимірної моделі зразка в ПЗ Gmsh за файлом **ASTMD638_type_I.geo** наведено на рисунку 3.2.

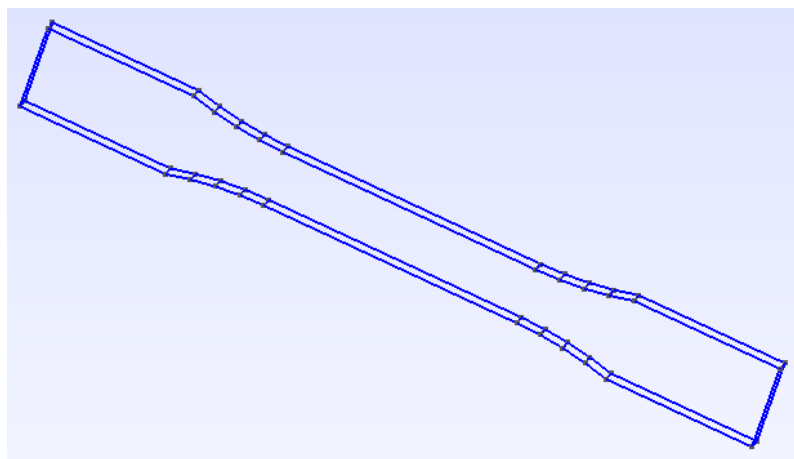
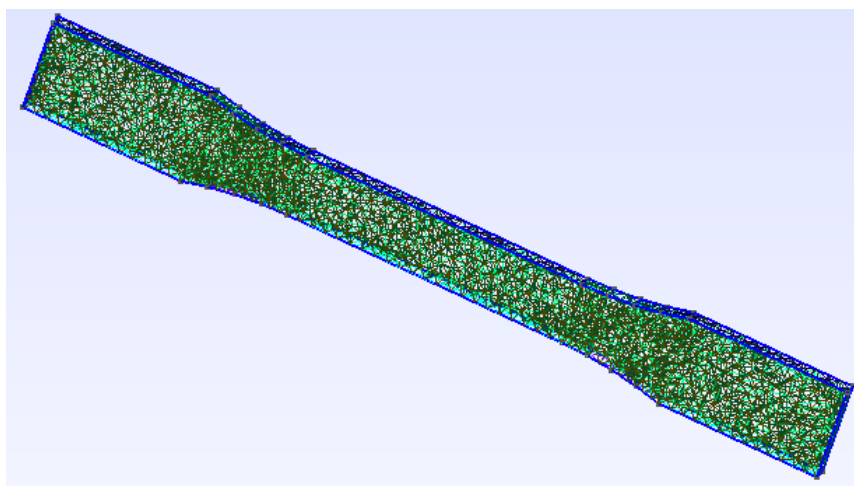


Рисунок 3.2 – Тривимірна модель зразка для числового випробування на розтяг

Результат скінченно-елементної дискретизації тривимірної моделі зразка за рисунком 3.1 в ПЗ Gmsh наведено на рисунку 3.3.



1892 – кількість вузлів; 5832 – кількість тетраедричних скінченних елементів

Рисунок 3.3 – Дискретизація тривимірної моделі зразка тетраедричними СЕ

Результат дискретизації тривимірної моделі зразка в ПЗ Gmsh (див. рисунок 3.3) записується в текстовому форматі у файл **ASTMD638_type_I.msh**. З використанням інструментів Gmsh також визначаються номери поверхонь зразка для задання закріплення (нижній торець) та силового навантаження (верхній торець).

Другий етап побудови числової моделі НДС відбувається в програмному середовищі Mathcad з використанням програмного коду авторської розробки [30].

Спочатку необхідно в програмі Mathcad відкрити відповідний файл, наприклад, для ортотропного композиту – **Ortothopy_CAD_Gmsh.xmcd**, в якому знаходиться програмний код для розв’язання задачі НДС. Аналог такого файлу у випадку НДС ізотропного середовища наведено в [33]. В цьому файлі спочатку задаються фізичні властивості армованого полімеру та силове навантаження на зразок, що визначаються: у разі ізотропного композиту за формулами (2.10)–(2.12) і (2.15) залежно від об’ємних часток волокна і матриці; для ортотропного матеріалу за формулами (2.18)–(2.20) і (2.23) також залежно від об’ємних часток волокна і матриці. Далі зчитується скінченно-елементна сітка з файлу **ASTMD638_type_1.msh**. Потім задаються граничні умови: закріплення на нижньому торці зразка і силове навантаження у вигляді тиску з від’ємним знаком на верхньому його торці. Далі виконується розв’язання задачі НДС. При цьому матриця жорсткості для ізотропного матеріалу визначається за (2.38), а для ортотропного – (2.9). Потім визначаються компоненти тензорів деформації і напруження в СЕ і вузлах, обчислюються модуль переміщення, еквівалентні деформації та напруження за Мізесом у вузлах моделі зразка. Координати вузлів СЕ та вузлові значення вищевказаних фізичних величин записуються у текстовий файл **Orto_Gmsh_3D_Tec.dat** зі структурою програми TecPlot [37].

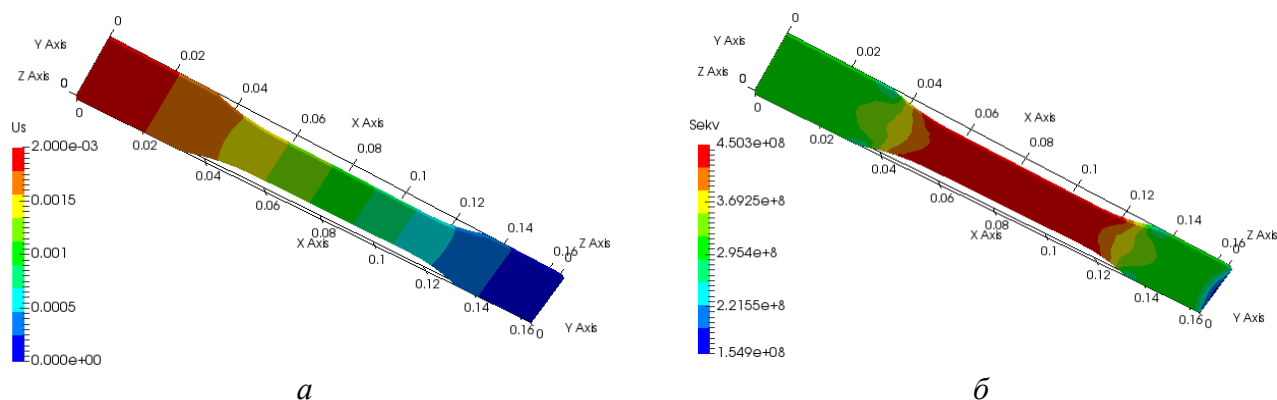
На третьому етапі відбувається робота з ПЗ ParaView, в якому зчитується файл **Orto_Gmsh_3D_Tec.dat**, виконується перегляд та аналіз таких фізичних полів як сумарних переміщень, еквівалентної деформації та напруження за Мізесом тощо.

3.2 Верифікація числових моделей

З використанням розроблених числових моделей (див. п. 3.1) виконано тестові розрахунки НДС армованого полімерного матеріалу з ізотропними та ортотропними властивостями. При цьому склад армованого природними волокнами прийнято аналогічним [21]: матриця – Vinyl ester resin, волокно Abaca, 40 %. У разі ізотропного наближення механічні властивості композитного полімеру та силове навантаження під час теоретичного випробування на міцність приймалися такими:

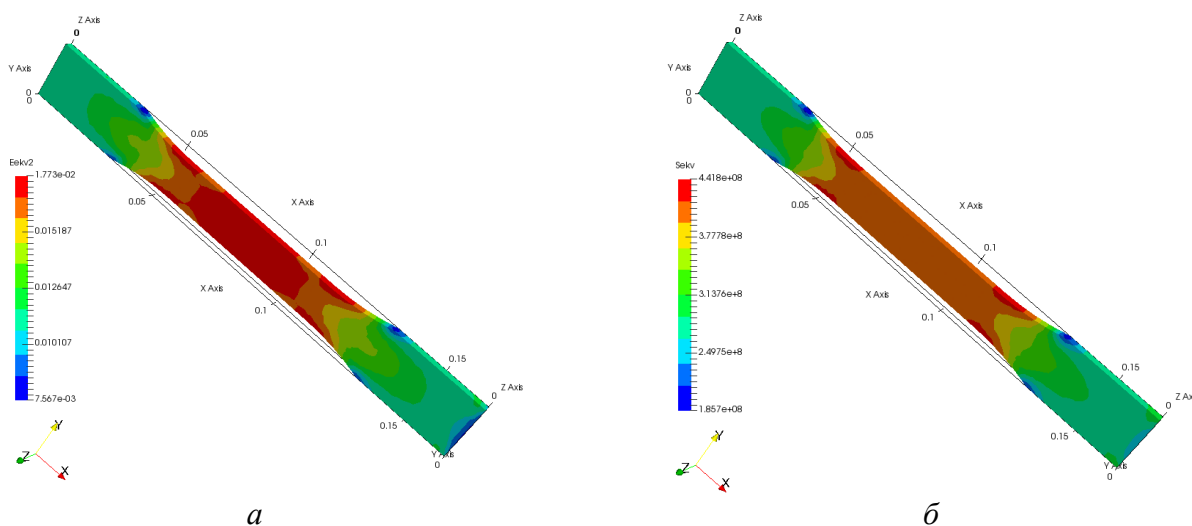
$E_{\text{comp}} = 31,08 \text{ ГПа}$, $\nu_{\text{comp}} = 0,331$; $[\sigma_{\text{TS}}]_{\text{comp}} = 441,8 \text{ МПа}$; $F = 16,69 \text{ кН}$. Для випадку ортотропного наближення механічні властивості композитного полімеру та силове навантаження під час випробування на міцність задавалися такими: $E_1 = 31,08 \text{ ГПа}$, $E_2 = E_3 = 6,118 \text{ ГПа}$; $\nu_{12} = \nu_{13} = 0,331$, $\nu_{21} = \nu_{31} = 0,065$, $\nu_{23} = \nu_{32} = 0,329$; $[\sigma_{\text{TS}}]_I = 441,8 \text{ МПа}$; $F = 16,12 \text{ кН}$.

Результати тестових розрахунків показано на рисунках 3.4, 3.5.



a – поле результируючих переміщень – U_s (м); b – поле еквівалентних напружень за Мізесом – σ_{eqM} (Па)

Рисунок 3.4 – Результати розрахунків НДС армованого полімеру з ізотропними властивостями



a – поле еквівалентних напружень за Мізесом – ϵ_{eqM} (м); b – поле еквівалентних напружень за Мізесом – σ_{eqM} (Па)

Рисунок 3.5 – Результати розрахунків НДС армованого полімеру з ортотропними властивостями

Верифікацію розроблених числових моделей НДС армованих полімерів виконано за допомогою зіставлення з даними відповідного числового аналізу, виконаного з використанням ANSYS Mechanical APDL [15].

Зіставлення результатів числових експериментів, проведених за допомогою ПЗ авторської розробки, з даними числового аналізу, виконаного з використанням ANSYS Mechanical APDL для ізотропного композиту наведено в таблиці 3.1, а для ортотропного – в таблиці 3.2.

Таблиця 1 – Порівняння розв’язків задачі НДС зразка ізотропного композитного матеріалу, отриманих у результаті використання власного програмного коду та програмного продукту ANSYS Mechanical APDL

Тип розв’язку	U_s , м	ε_{eqM}	σ_{eqM} , Па
ANSYS APDL, $N=1156$, $El=3036$	0–0,001911	0,004723– 0,014212	1,46e8– 4,418e8
Mathcad, $N=1892$, $El=5832$	0–0,001917	0,004543– 0,014216	1,43e+08 –4,418e+08
Різниця, %	0,31	3,81–0,03	2,74–0

Таблиця 3.2 – Порівняння розв’язків задачі НДС зразка ортотропного композитного матеріалу, отриманих у результаті використання власного програмного коду та програмного продукту ANSYS Mechanical APDL

Тип розв’язку	U_s , м	ε_{eqM}	σ_{eqM} , Па
ANSYS APDL, $N=1156$, $El=3036$	0–0,001867	0,007306– 0,017473	1,76e+08– 4,418e+08
Mathcad, $N=1892$, $El=5832$	0–0,001856	0,007567– 0,017727	1,807e+08– 4,418e+08
Різниця, %	0,59	3,57–1,45	2,67–0

Висновки до розділу 3

- 1) Розроблено програмне забезпечення для розв'язання задач НДС в наближеннях ізотропного та ортотропного середовищ на базі методу скінченних елементів з використанням системи Mathcad.
- 2) На базі розробленого ПЗ створено числові моделі НДС в наближеннях ізотропного та ортотропного середовищ для теоретичного випробування зразків полімерного композиту на розтяг з геометричними характеристиками за стандартом ASTM D638.
- 3) Виконано верифікацію розроблених числових моделей за даними числових експериментів, отриманих за допомогою ANSYS Mechanical APDL. Встановлено, що різниця між результатами розрахунків не перевищує 3,8 %, що є цілком прийнятним для проведення інженерних розрахунків з метою визначення ефективних значень механічних властивостей армованих полімерів.

За матеріалами розділу 3 надруковано 2 тези доповідей в матеріалах всеукраїнських науково-технічних конференцій.

4 ЧИСЛОВИЙ АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ АРМОВАНИХ ПОЛІМЕРІВ

4.1 Вибір матеріалів полімерної матриці та природного армувального волокна для розробки нових біо-композитів та визначення їхніх механічних властивостей

На підставі літературного огляду (див. розділ 1) встановлено, що для армування підходять такі полімери як поліетилен високого та низького тиску, поліпропілен, полістирол тощо, а за армувальні волокна можна обрати волокна таких широкодоступних рослин як кокос, бавовна, банан, конопля і льон. Механічні властивості вказаних полімерів та волокон рослин наведено в таблицях 4.1 і 4.3, відповідно.

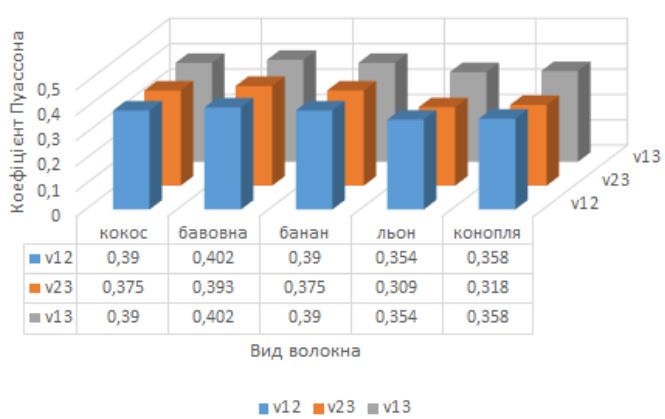
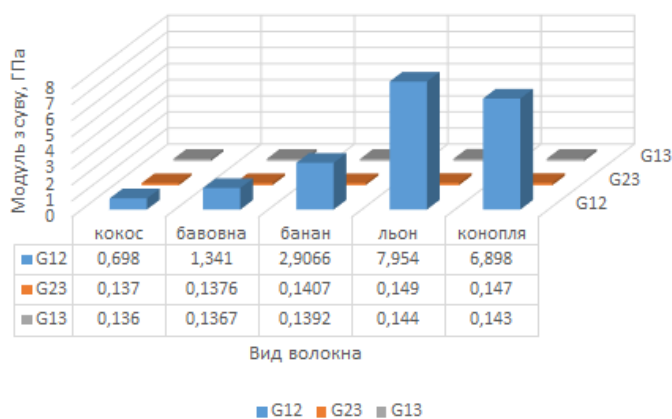
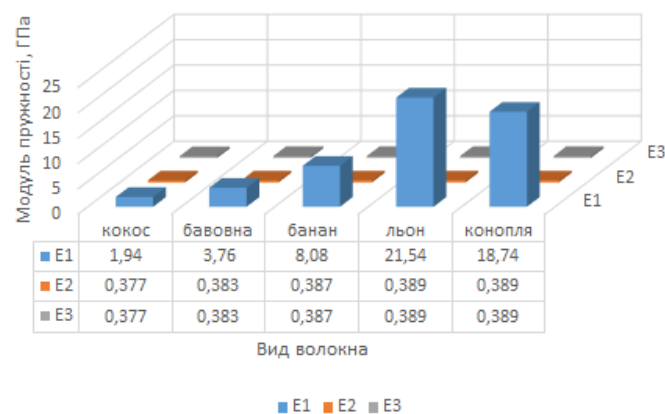
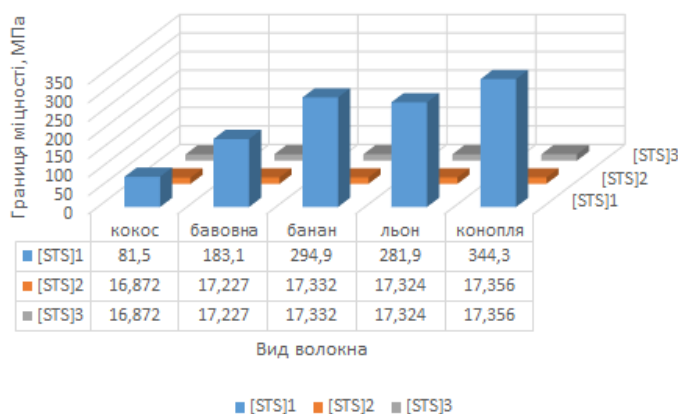
З використанням обраних полімерів (див. таблицю 4.1) та волокон (див. таблицю 4.2) та аналітичних співвідношень (2.18)–(2.20) для ортотропного наближення визначено ефективні механічні властивості композитних полімерів, армованих волокнами природного походження. Дані з механічних властивостей вказаних композитів, що включають компоненти вектора границі міцності і модуля пружності та компоненти тензора коефіцієнтів Пуассона, наведено в додатку Б і на рисунках 4.1–4.4.

Таблиця 4.1 – Механічні властивості полімерів [43–46]

№	Полімер	ρ , кг/м ³	$[\sigma_{TS}]$, МПа	E , ГПа	ν
1	Поліетилен високого тиску (ПВТ) – Polyethylene HP	910–930	8–13	0,118–0,35	0,4–0,5
2	Поліетилен низького тиску (ПНТ) – Polyethylene LP	940–970	10–19	0,61–1,6	0,15–0,2
3	Поліпропілен (ПП) блок-сополімер (РР) – Polypropene	915	25–40	1,7	0,42
4	Полістирол (ПС) – Polystyrene	1060	40–50	3,2	0,35

Таблиця 4.2 – Механічні властивості волокна природного походження [21]

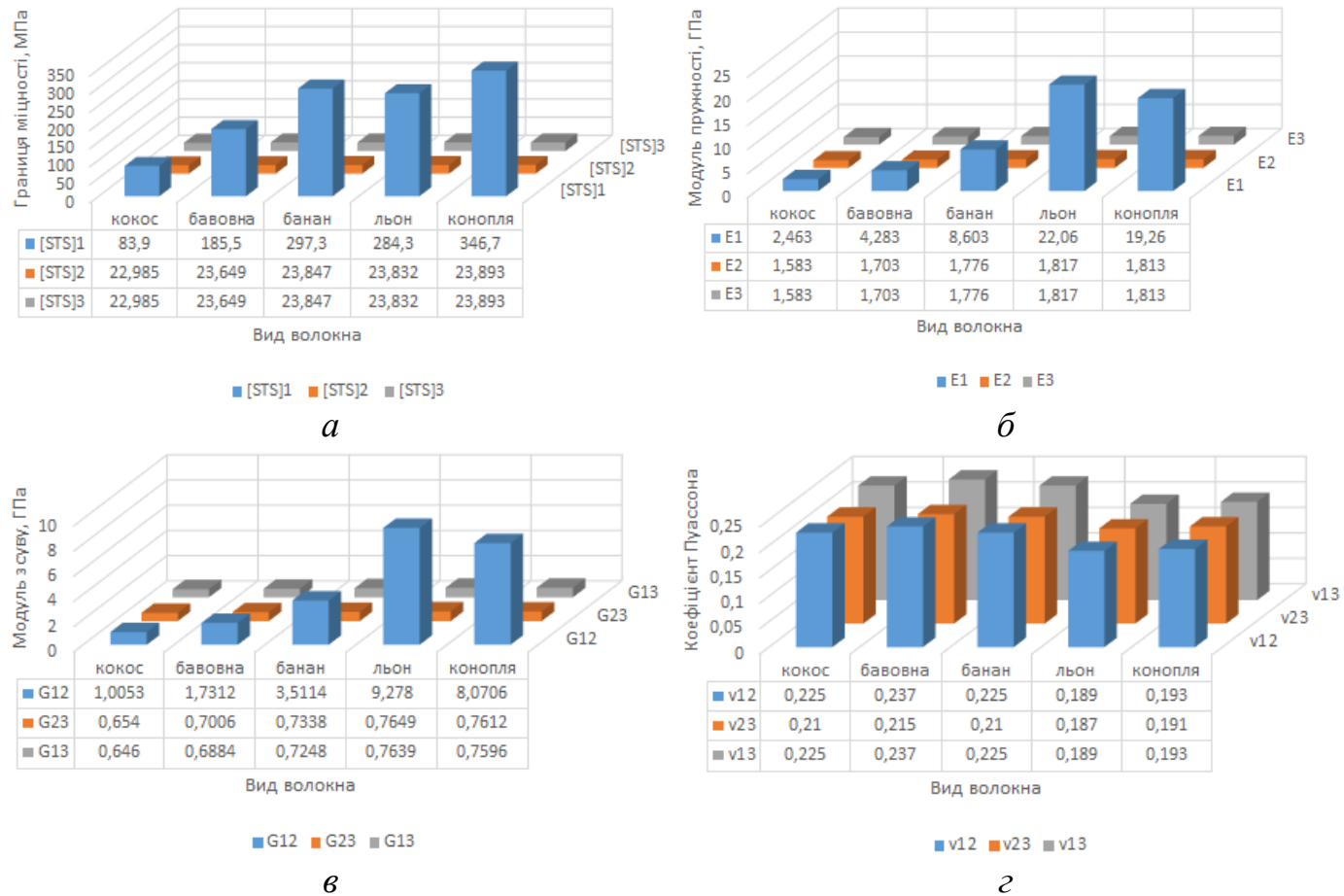
№	Волокно	ρ , кг/м ³	$[\sigma_{TS}]$, МПа	E , ГПа	ν
1	Кокосове волокно – Coir	1250–1500	106–270	3–6	0,3
2	Бавовняне волокно – Cotton	1500–1600	287–597	5,5–12,6	0,33
3	Бананове волокно – Banana	1300–1350	529–914	7,7–32	0,3
4	Конопляне волокно – Hemp	1400–1500	580–1110	3–90	0,221
5	Льняне волокно – Flax	1400–1500	343–1035	27–80	0,21



a – границя міцності; b – модуль пружності; v – модуль зсуву;

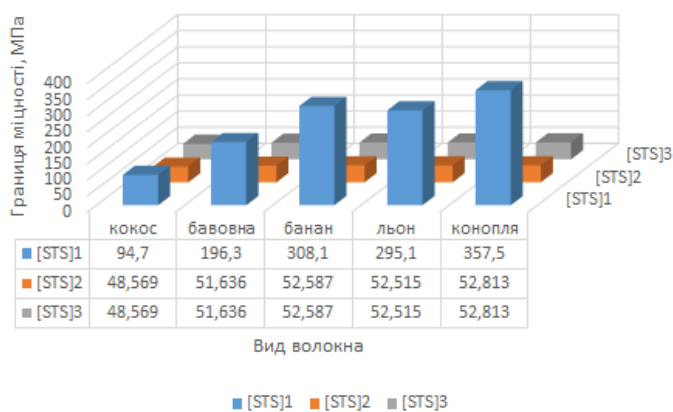
z – коефіцієнт Пуассона

Рисунок 4.1 – Ефективні механічні властивості ортотропного композитного полімеру на основі поліетилену високого тиску із 40 % вмістом за об'ємом армувального волокна

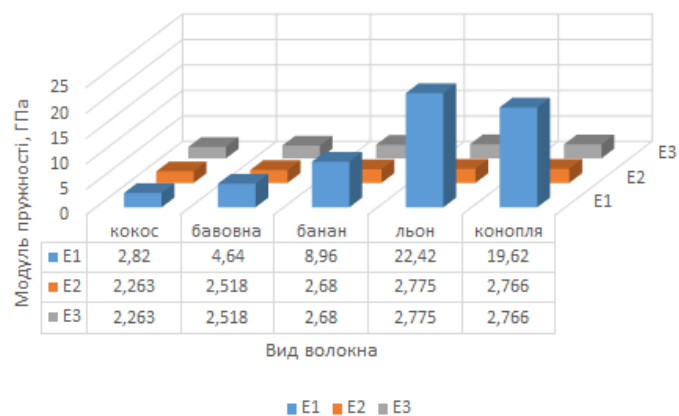


а – границя міцності; *б* – модуль пружності; *в* – модуль зсуву;
г – коефіцієнт Пуассона

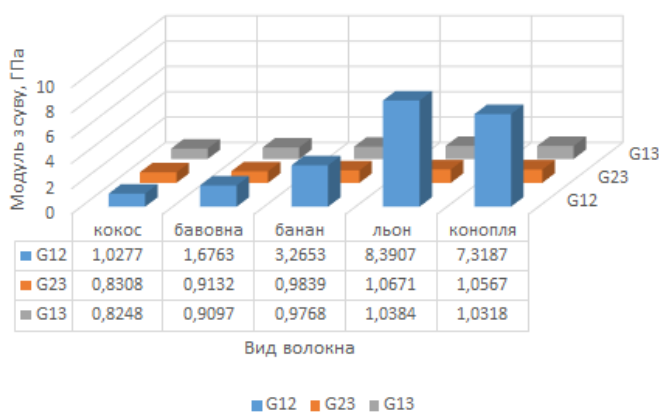
Рисунок 4.2 – Ефективні механічні властивості ортотропного композитного полімеру на основі поліетилену низького тиску із 40 % вмістом за об’ємом армувального волокна



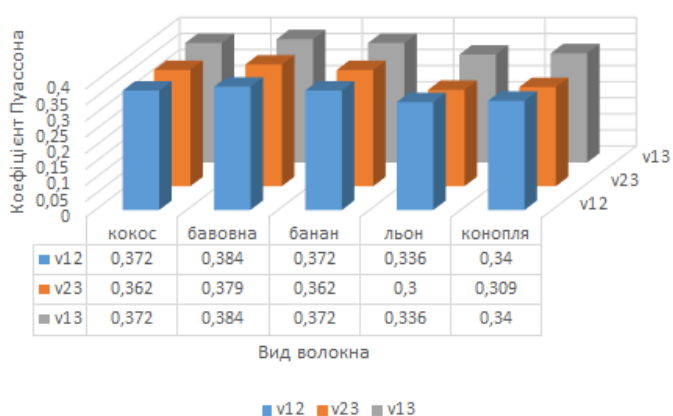
а



б



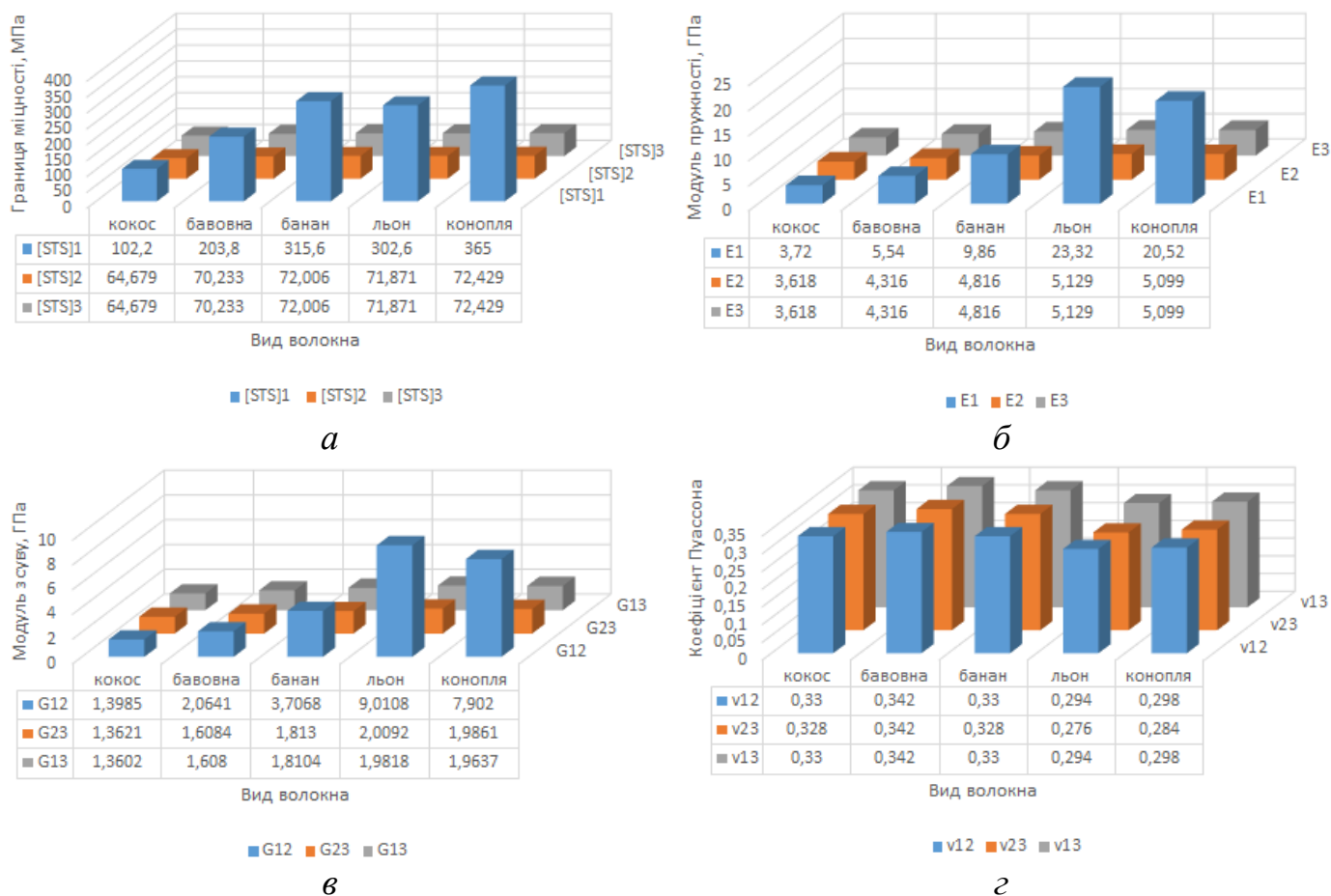
в



г

а – границя міцності; б – модуль пружності; в – модуль зсуву;
г – коефіцієнт Пуассона

Рисунок 4.3 – Ефективні механічні властивості ортотропного композитного полімеру на основі поліпропілену із 40 % вмістом за об'ємом армувального волокна



а – границя міцності; *б* – модуль пружності; *в* – модуль зсуву;
г – коефіцієнт Пуассона

Рисунок 4.4 – Ефективні механічні властивості ортотропного композитного полімеру на основі полістіролу із 40 % вмістом за об'ємом армувального волокна

З використанням даних (див. рисунок 4.1–4.4, додаток Б) та аналітичних залежностей (2.21), (2.22) визначено такі фізичні властивості композитів як жорсткість і ударна в'язкість для напрямку максимального значення границі міцності (*OX*). Результати цих розрахунків наведено на рисунках 4.5, 4.6.



Рисунок 4.5 – Залежність ударної жорсткості (U_T , МДж/м³) полімерних композитних матеріалів від типу матриці і волокна з об'ємною часткою 40 %

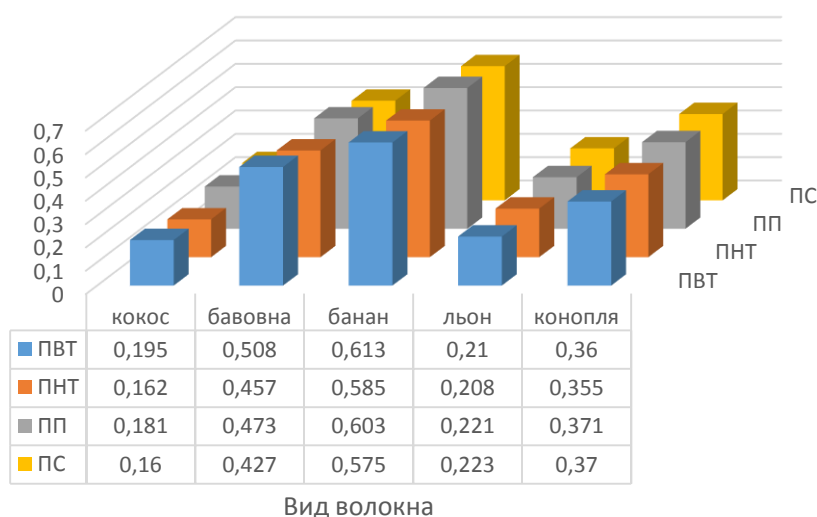


Рисунок 4.6 – Залежність ударної в'язкості (G_{IS} , МДж/м²) полімерних композитних матеріалів від типу матриці і волокна з об'ємною часткою 40 %

Ефективні ортотропні механічні властивості композитних полімерів, армованих природними волокнами, також були визначені за допомогою числового аналізу НДС зразків композитів згідно стандарту ASTM D638 з використанням алгоритму (див. розділ 2, п. 2.3.2) і ПЗ авторської розробки (див. розділ 3). Зіставлення даних з механічних властивостей розроблених полімерних композитів

показало, що розбіжність між ними не перевищує похибки числових розрахунків НДС і лежить в межах 1–3 %.

Аналіз отриманих даних показує, що:

- найвищі значення механічних властивостей спостерігаються у разі використання волокна банану, льону та коноплі, зокрема, модуль пружності за напрямком волокна становить більше ніж 8 ГПа, а границя міцності – більше ніж 290 МПа, що перевищує міцність Ст. 3 (230 МПа);
- жорсткість та ударна в'язкість найвища у разі застосування армувального волокна з бавовни і банана та становить понад 8,9 МДж/м³ та 0,5 МДж/м², відповідно.

4.2 Оцінка похибки застосування аналітичних співвідношень для визначення ефективних механічних властивостей композитних полімерів

Відомо, що найбільш суттєвим припущенням (гіпотезою) під час дослідження механічних властивостей композитів є те, що деформації у напрямку волокна односпрямованого волокно-армованого композитного матеріалу однакові як у волокнах, так і у матриці [7]. Але, на практиці, таке припущення або взагалі не виконується, або виконується частково. Тому доцільно виконати відповідні числові оцінки роботоздатності висунутої гіпотези, тобто визначити, коли можна користуватися аналітичними залежностями (2.18)–(2.20) для розрахунків ефективні механічних властивостей композитних полімерів.

Для виконання цих досліджень у дисертаційній роботі було розглянуто два граничних випадки: перший – абсолютний контакт між волокном і матрицею; другий – зовсім відсутня контактна взаємодія між волокном і матрицею (тобто відсутня адгезія між фазами композиту, що викликає проковзування матриці повз волокно).

Для проведення такого дослідження була створена найпростіша модель композитного полімеру, яка складається з одного волокна циліндричної форми, оточеного полімерною матрицею. При цьому механічні властивості матриці та

волокна відповідають не ефективним, а дійсним значенням цих матеріалів в ізотропному наближенні (рисунок 4.7). Реалізація умов абсолютного контакту та його відсутності відбувається в процесі побудови числової моделі.

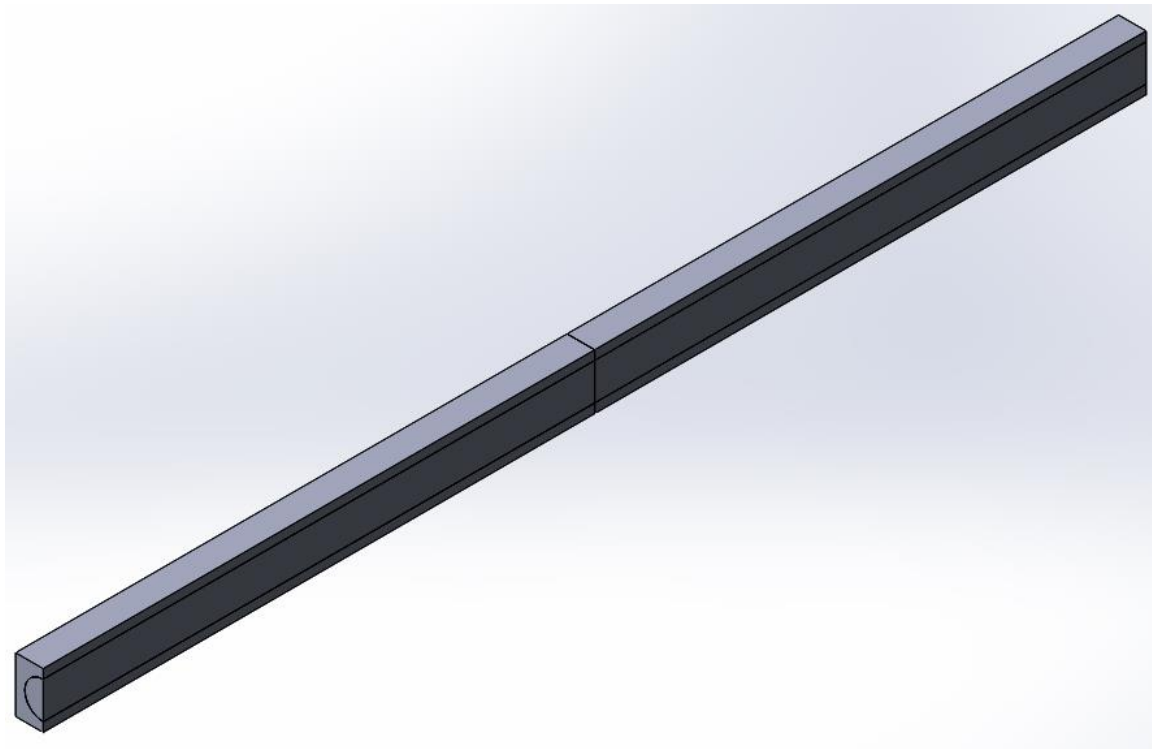
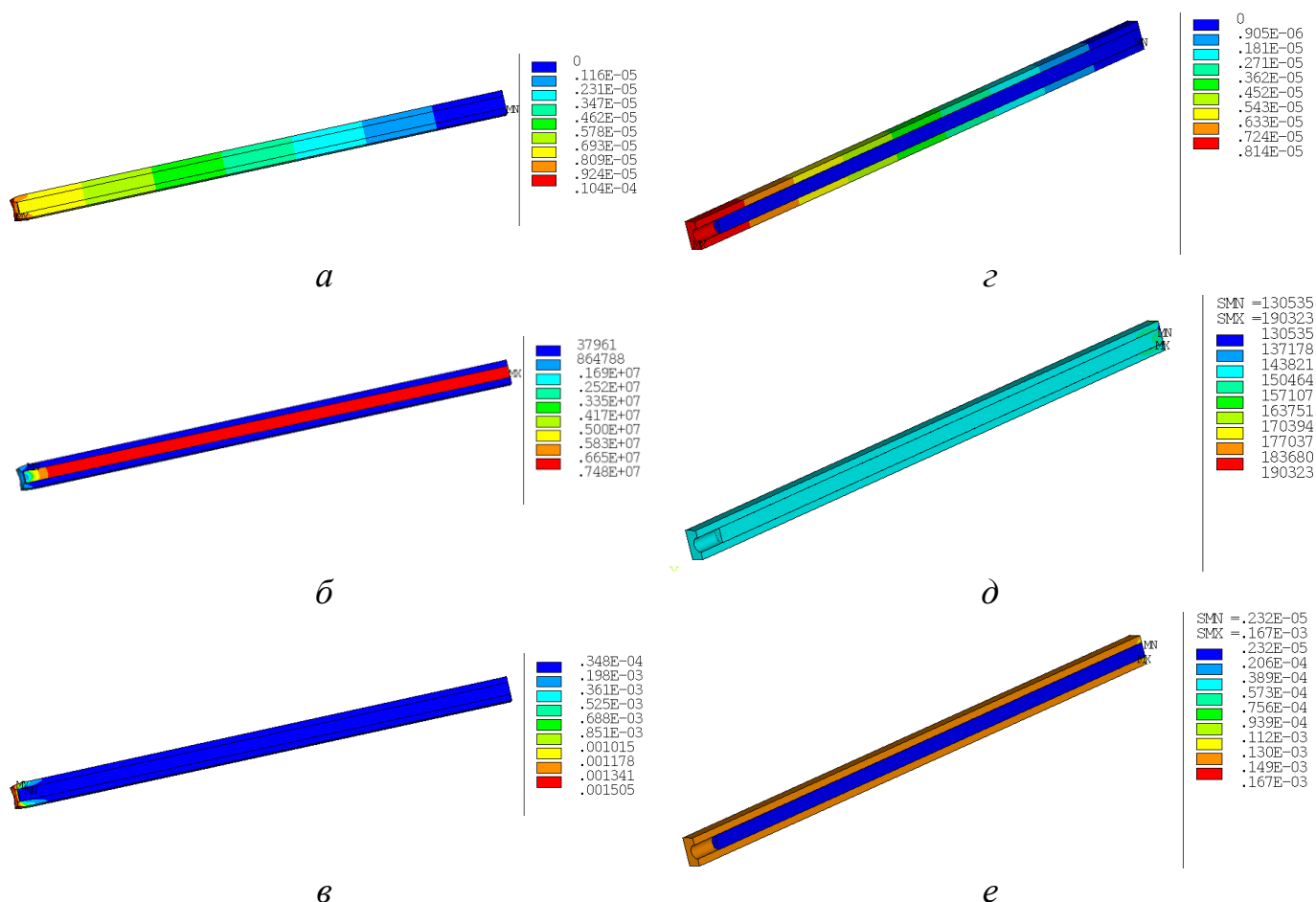


Рисунок 4.7 – Твердотільна модель полімерного композиту (SolidWorks)

Подальша побудова числової моделі виконана з використанням програмних продуктів ANSYS Mechanical APDL [15] за допомогою розробки відповідного макросу, написаного на мові програмування APDL. За граничні умови приймалися такі: з одного торця композиту задавалося закріплення, а з протилежного тиск з від'ємним знаком (тобто до волокна і матриці задається однакове силове навантаження). Результати розрахунків НДС для двох випадків контактної взаємодії між волокном і матрицею наведено на рисунку 4.8.



a, б, в – абсолютний контакт; *г, д, е* – відсутній контакт між волокном і матрицею;
a, г – переміщення; *б, д* – нормальне напруження на осі навантаження;
в, е – нормальна деформація на осі навантаження

Рисунок 4.8 – Результати розрахунків НДС для двох випадків контактної взаємодії між волокном (Ø15 мм) і матрицею

З метою оцінки похибки застосування аналітичних співвідношень для визначення ефективних механічних властивостей композитних полімерів використано такий алгоритм:

- після виконання розрахунків НДС моделі композиту в поперечному січенні по середині зразка визначаються середні значення нормального напруження σ_{11} і деформації ε_{11} в напрямку дії силового навантаження і поперечна нормальна деформація $\varepsilon_{22} = \varepsilon_{33}$ за формулами:

$$\sigma_{11} = \frac{\int \sigma_{11}(A) dA}{A_z}, \quad (4.1)$$

$$\varepsilon_{11} = \frac{\int \varepsilon_{11}(A) dA}{A_z}, \quad (4.2)$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{\int \varepsilon_{22}(A) dA}{A_z}, \quad (4.3)$$

де A_z – площа поперечного перерізу зразка, м^2 ;

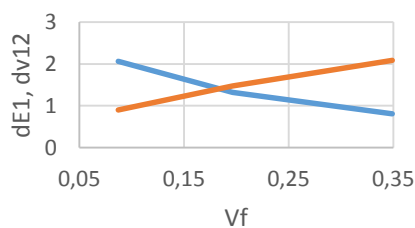
- потім виконуються розрахунки ефективних механічних властивостей композиту (модуля пружності і коефіцієнт Пуассона) за формулами:

$$E_1 = \frac{\sigma_{11}}{\varepsilon_{11}}, \quad (4.4)$$

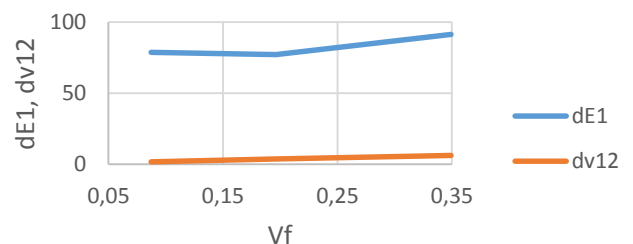
$$\nu_{12} = \frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}}; \quad (4.5)$$

- виконується порівняння механічних властивостей, обчислених за (4.4), (4.5) з властивостями, знайденими за (2.19)–(2.20), визначається відносна похибка.

Результати оцінки похибки застосування аналітичних співвідношень для визначення ефективних механічних властивостей композитних полімерів для двох випадків контактної взаємодії між волокном і матрицею наведено на рисунку 4.9.



a



б

a – абсолютний контакт; *б* – відсутня контактна взаємодія між волокном і матрицею

Рисунок 4.9 – оцінки похибки застосування аналітичних співвідношень для визначення ефективних механічних властивостей композитних полімерів для двох випадків контактної взаємодії між волокном і матрицею

Аналіз отриманих даних показує, що:

- у разі наявності достатньої адгезії між фазами полімерного композиту і контакт між ними наближається до абсолютного похибка застосування аналітичних співвідношень для визначення ефективних механічних властивостей композиту не перевищує 2,1 %, що цілком достатнім для виконання інженерних розрахунків на міцність;
- у випадку відсутності достатньої адгезії між фазами полімерного композиту і силова взаємодія між ними наближається до нуля похибка застосування аналітичних співвідношень для визначення ефективних механічних властивостей композиту перевищує 90 % для модуля пружності, що яскраво свідчить про неможливість застосування адитивних співвідношень для визначення механічних властивостей полімерів у разі недостатньої адгезії між полімером та волокном.

Висновки до розділу 4

- 1) Визначено ефективні ортотропні механічні властивості композитних полімерів (ПВТ, ПНТ, ПП і ПС), армованих природними волокнами (кокос, бавовна, банан, конопля і льон), з використанням аналітичних співвідношень та результатів числового моделювання НДС.
- 2) Встановлено, що: найвищі значення механічних властивостей спостерігаються у разі використання волокна банану, льону та коноплі, зокрема, модуль пружності за напрямком волокна становить більше ніж 8 ГПа, а границя міцності – більше ніж 290 МПа, що перевищує міцність Ст. 3 (230 МПа).

- 3) Показано, що у разі наявності достатньої адгезії між фазами полімерного композиту і контакт між ними наближається до абсолютного похибка застосування аналітичних співвідношень для визначення ефективних механічних властивостей композиту не перевищує 2,1 %, що цілком достатнім для виконання інженерних розрахунків на міцність.

За матеріалами розділу 4 надруковано 2 тези доповідей в матеріалах всеукраїнських науково-технічних конференцій.

5 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ АРМОВАНИХ ПОЛІМЕРІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ВОЛОКНА ПРИРОДНОГО ПОХОДЖЕННЯ В ПАКУВАЛЬНІЙ ІНДУСТРІЇ

5.1 Пакування дрібних виробів

Корисна модель належить до пакувань для дрібних виробів, передусім для таблеток і пігулок, і може бути використана для упакування лікарських засобів і харчових продуктів та подальшого зберігання за певної вологості [38].

В основу розробки покладено задачу вдосконалити пакування, у якому його нове конструктивне виконання забезпечує можливість застосування сипкого адсорбенту з високою питомою поверхнею, а отже й підвищує надійність потрібних умов зберігання виробів в пакуванні.

Пакування містить вологонепроникну підкладку 1 і герметично з'єднану з нею пакувальну плівку 2 з утворенням відділених один від одного блоків 3, кожний з яких включає сполучені між собою за допомогою каналу 4 камеру 5 для розміщення упакованого виробу та камеру 6 для адсорбенту, при цьому зазначені камери 5 і 6 та канали 4 сформовані у вигляді западин у пакувальній плівці 2, а кожний канал 4 перекрито вкладишем 7 з відкритими порами (рисунок 5.1, *а, б*). Також кожний вкладиш 7 може бути розташований у сформованому в пакувальній плівці розширенні відповідного каналу 8 (див. рисунок 5.1, *а*).

Пакування працює в такий спосіб. Під час зберігання виробів у пакуванні завдяки відкритопористій структурі вкладишів 7 крізь канали 4 забезпечується надійне сполучення між камерами 5 і 6 для розміщення упакованого виробу та адсорбенту. При цьому забезпечується вбирання адсорбентом надлишкової вологи з газу, що міститься в порожнинах блоків 3 пакування.

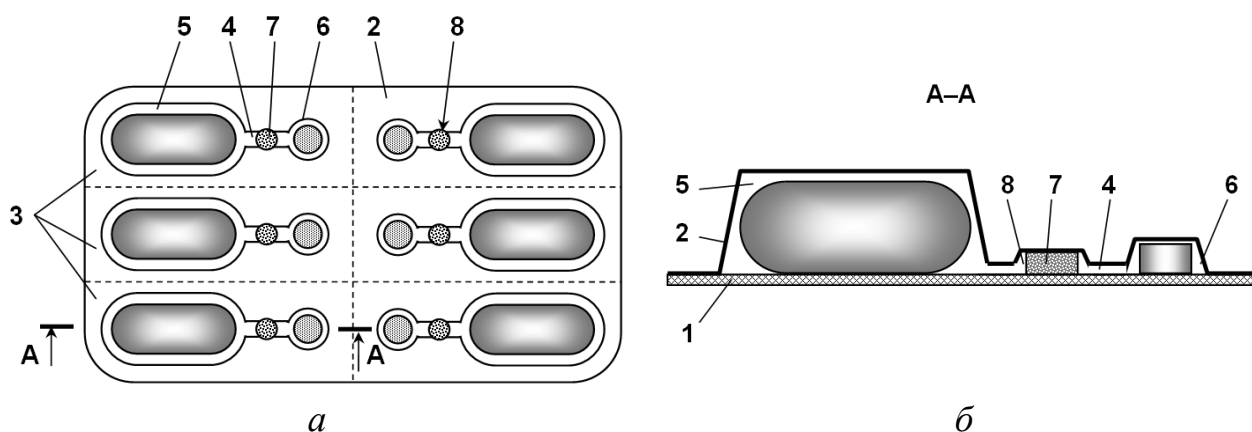


Рисунок 5.1 – Пакування лікарських засобів і харчових продуктів (пояснення в тексті)

Формовану пакувальну плівку 2 можна виготовляти з армованого природними волокнами полімерного композиту, що забезпечує здатність до природного розкладання пакування після використання.

5.2 Числовий аналіз міцності тари, виготовленої з армованого полімеру

Для виконання числового аналізу міцності виробів з армованого полімеру виберемо тару у вигляді пляшки, а за тип випробування на міцність – під надлишковим тиском. За даними ресурсу [39] ПЕТ-пляшки випробовують під надлишковим тиском до 20 бар, а скляні – до 70 бар.

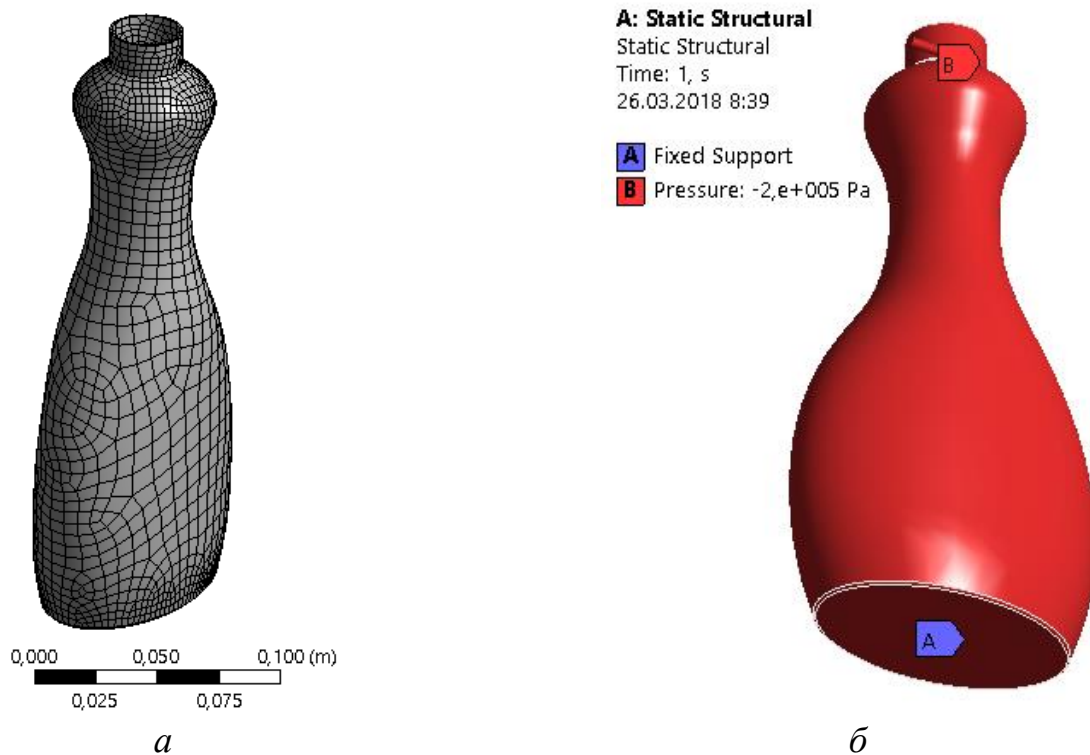
На першому етапі побудови числової моделі тари була розроблена твердотільна модель пляшки для зберігання м'яких засобів з використанням CAD-системи SolidWorks [40, 41] (рисунок 5.2).



Рисунок 5.2 – Твердотільна модель пляшки з полімерного матеріалу

Для побудови числової моделі НДС пляшки використано програмний продукт ANSYS Workbench і тип аналізу – static structural analysis [42]. Побудова числової моделі НДС пляшки включала такі етапи в проекті static structural:

- 1) Engineering Data – підготовка механічних властивостей матеріалу;
- 2) Geometry – імпорт твердотільної моделі пляшки (див. рисунок 5.2) в програму Design Modeler [42]. Перетворення твердотільної моделі пляшки в модель, що містить тільки поверхні з віртуальною товщиною стінки, яку можна змінювати. Це потрібно для того, щоб під час скінченно-елементного аналізу використовувати поверхневі (Shell) елементи, що значно спрощує процедуру дискретизації складної геометричної моделі, підвищує точність розрахунків та зменшує вимоги до обчислювальних ресурсів;
- 3) Model – вибір матеріалу пляшки, виконання дискретизації моделі (рисунок 5.3,а), задання граничних умов – закріплення і надлишкового тиску (рисунок 5.3,б), вибір полів переміщення, еквівалентних значень деформації і напруження та запасу міцності і виконання саме розрахунків.

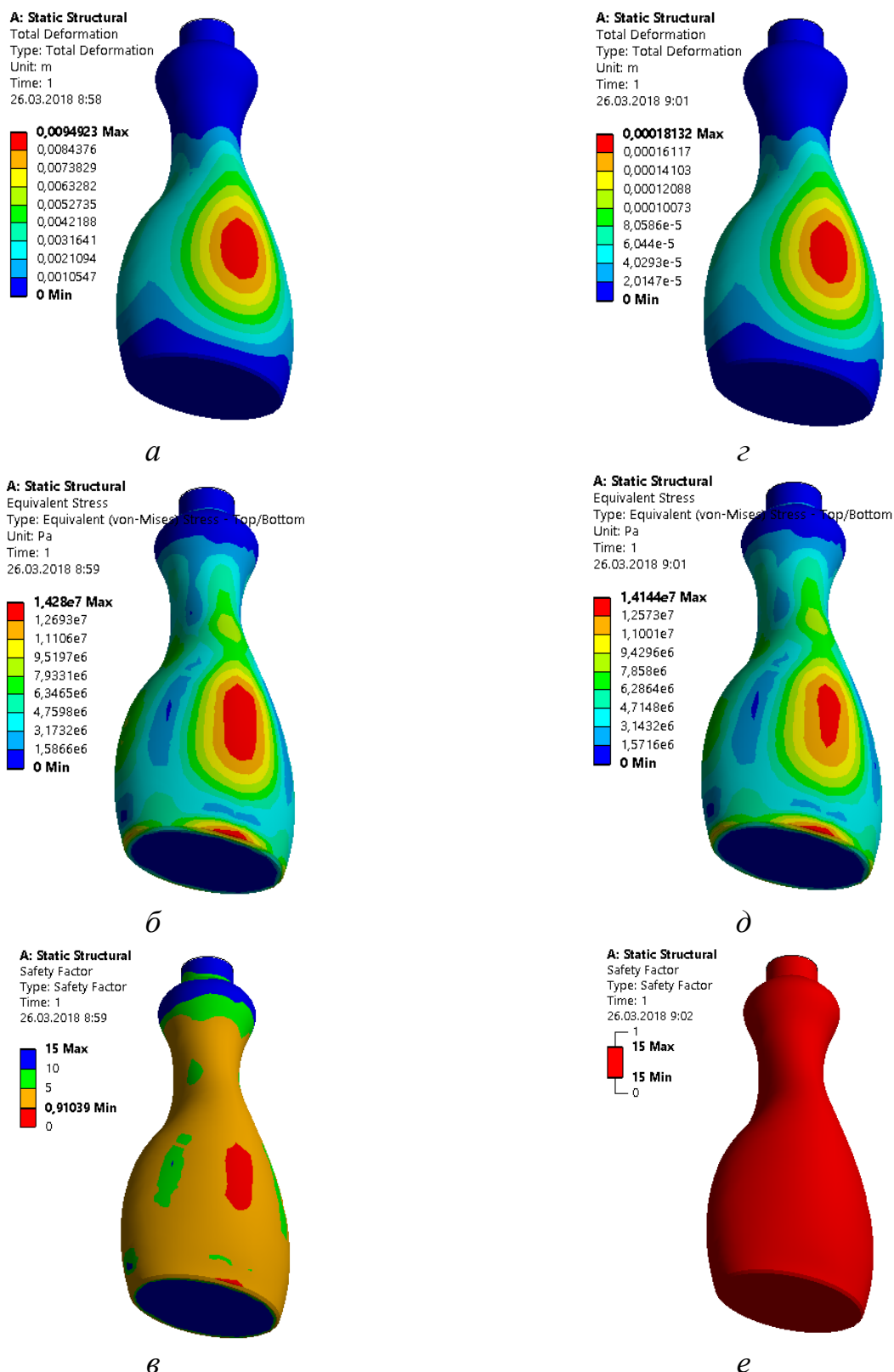


кількість вузлів – 2342; кількість елементів – 2341; надлишковий тиск 2 бар;
товщина стінки пляшки 3 мм

Рисунок 5.3 – Дискретизація числової моделі пляшки (а) та схема силового навантаження (б)

З метою порівняння результатів розрахунків на міцність пляшки розрахунки НДС пляшки виконувалися для двох типів матеріалів (див. розділ 4): 1) матеріал – поліетилен високого тиску; 2) композитний матеріал – ПВТ армований 40 % конопляного волокна.

Розрахунки НДС виконувалися для товщини пляшки 1,5 мм. Порівняння результатів числового аналізу НДС пляшок наведено на рисунку 5.4.



a, б, в – матеріал пляшки ПВТ; *г, д, е* – матеріал пляшки ПВТ армований 40 % конопляного волокна; *a, г* – поле переміщення; *б, д* – поле еквівалентного напруження за Мізесом; *в, е* – поле запасу міцності

Рисунок 5.4 – Результати числового аналізу НДС пляшок

Аналіз результатів розрахунків показує, що у разі використання армованого природним волокном полімеру для виготовлення пляшок запас міцності зростає до більше ніж 15, що дає змогу зменшити товщину стінки пляшки з 3 мм до 1 мм. При цьому запас міцності буде становити понад 6.

Висновки до розділу 5

- 1) За результатами наукових досліджень магістерської дисертації отримано патент України [38], що включає спосіб пакування лікарських пігулок, зокрема, з використанням армованих природним волокном полімерів.
- 2) Розроблено числову модель НДС полімерної пляшки для випробування під надлишковим тиском. Встановлено, що у разі використання армованого природним волокном полімеру для виготовлення пляшок запас міцності зростає до більше ніж 15, що дає змогу зменшити товщину стінки пляшки з 3 мм до 1 мм. При цьому запас міцності буде становити понад 6.
- 3) Використання пляшок, виготовлених з композитних полімерів, армованих природними волокнами, що відносяться до відновлювальної сировини, одночасно вирішує дві проблеми: перша стосується підвищення міцності, що забезпечує ресурсозбереження, а друга стосується можливості природного розкладання після використання тари під дією сил навколишнього середовища.

За матеріалами розділу 5 надруковано тезу доповіді у матеріалах всеукраїнської науково-технічної конференції, подано 1 статтю для опублікування у фаховому журналі України та отримано патент на корисну модель України.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Сучасний розвиток науки і техніки приносить принципові нововведення у всі сфери матеріального виробництва, суттєво змінюючи технологічні процеси та матеріали що використовуються, предмети та знаряддя праці. В свою чергу зміни технології та устаткування призводять до трансформації умов праці та трудового процесу в цілому. Апарати, які вводяться в експлуатацію, як і все інше обладнання, повинно відповідати всім вимогам техніки безпеки і охорони праці, які сформульовані в галузевих стандартах, а також в затверджених інстанціями інструкціях, правилах і нормах.

Закон України про охорону праці 1992 р. [49] визначає основні положення щодо реалізації конституційного права працівників на охорону їх життя і здоров'я у процесі трудової діяльності, на належні, безпечні і здорові умови праці, регулює за участю відповідних органів державної влади відносини між роботодавцем і працівником з питань безпеки, гігієни праці та виробничого середовища і встановлює єдиний порядок організації охорони праці в Україні.

Охорона праці й оточуючого середовища включає в себе питання безпеки праці, усунення причин травматизму і попередження професійних захворювань, аварійних ситуацій на виробництві; питання правової охорони праці [50–58]. Необхідно розробити безпечні і нешкідливі умови для обслуговуючого персоналу. Виконання правил техніки безпеки є основною умовою зниження виробничого травматизму.

Площа робочого приміщення становить 32 м^2 , об'єм – 105 м^3 .

Відповідно до теми дисертаційної роботи «Механічні властивості пакувальних полімерних матеріалів, армованих природними волокнами» в данному розділі на стадії експлуатації аналізуються умови праці при роботі з пластмасами. Основні шкідливі фактори на робочому місці оператора, що обслуговує установку наступні:

- повітря робочої зони;
- виробничий шум та вібрація;

- промислове освітлення;
- електронебезпека;
- пожежна безпека.

Установка встановлюється в закритих приміщеннях, може працювати самостійно або входити в склад технологічної лінії. Щоб попередити вихід установки із ладу, необхідний систематичний нагляд і догляд за нею як в процесі експлуатації, так і при ремонтах. Лише при ретельному дотриманні правил експлуатації можна забезпечити довготривалу працездатність у відповідності з її конструктивним призначенням і для тих середовищ і параметрів, на які розрахований матеріал.

Вимоги безпеки поставлені до обладнання протягом всього строку його служби. Власне безпека промислового обладнання забезпечена наступними заходами:

- правильним вибором принципів дії, конструктивних схем, безпечних елементів конструкції, матеріалів і т.д.;
- використанням в конструкції засобів механізації, автоматизації і дистанційного керування;
- використанням в конструкції спеціальних засобів безпеки;
- включенням вимог безпеки в технічну документацію на монтаж, експлуатацію, ремонт, транспортування і зберігання.

6.1 Повітря робочої зони

При проведенні робіт, пов'язаних з інтенсивними пилом — і газовиділеннями, за умови неможливості забезпечення технічними засобами гранично допустимих концентрацій шкідливих речовин у робочій зоні, працівники повинні бути забезпечені засобами індивідуального захисту органів дихання. Застосування фільтруючих протигазів можливе тільки в повітряній атмосфері, що містить не менше 18% об'ємної частки вільного кисню і не більше 0,5% сумарної об'ємної частки шкідливих домішок. При вмісті кисню в повітрі менше 18% об'ємної частки

або наявності шкідливих речовин понад 0,5% об'єму, а також при невідомому складі повітря або наявності в повітрі виробничих приміщень несорбируючихся речовин (метану, етану, бутану, етилену, ацетилену та інших) необхідно використовувати ізолюючі або шлангові протигази ПШ-1, ПШ-2; для захисту від променистої енергії джерела теплового випромінювання — спеціальні пристрої і пристосування: щити, екрани, водяні завіси та інші.

При роботах з шкідливими речовинами використовуються засоби захисту у відповідності з інструкціями по роботі з цими речовинами.

6.2 Виробничий шум та вібрація

Основним джерелом шуму та вібрації є робота компресора та вібраторів установки. За природою шум у даному випадку механічний, аеродинамічний. Рівень гучності звуку в джерелі становить близько 90 дБА.

Рівень звукового тиску в октавних полосах частот, рівень звуку на робочих місцях при працюючій установці не повинен перевищувати допустимих величин, встановлених у ДСН 3.3.6.037-99 [51].

Зниження шуму досягається шляхом шумопоглинання. Для цього використовують облицювання з перфорованим покриттям та плити. Щоб досягнути максимального ефекту використання шумопоглинаючого покриття, вкриваємо ним не менше 60% внутрішньої площі. Вихлопні патрубки насосів з'єднані з герметичним каналом, який забезпечує ізоляцію шума вихлопа.

Звукоізолююча здатність дверного проїому приміщення повинна бути не нижче 30 дБА. Стіни і перекриття цього приміщення забезпечені звукоізолюючим облицюванням з коефіцієнтом звукопоглинання не нижче 0,7 і мають звукоізолюючу здатність не нижче 50 дБА.

Працівник зобов'язаний використовувати і правильно застосовувати засоби індивідуального та колективного захисту. Крім засобів індивідуального захисту належних працівникові за основною професією, він так само повинен застосовувати:

при перевищенні рівня шуму вище допустимих значень на 6-8 дБА необхідно використовувати заглушки-вкладиші «беруші», а при більш високому перевищення слід застосовувати протишумові навушники;

Для персонального захисту органів слуху використовуються протишумові навушники ПШН-Б, які застосовують від дії середньо- та височастотного шуму з рівнем до 115 дБа.

Таким чином, рівень шуму у приміщенні при застосуванні вказаних заходів не перевищує 60 дБА, що відповідає нормам шуму за ДСН 3.3.6.037-99 [51] та вібрації за ДСН 3.3.6.039-99 [54] для виробничих приміщень.

6.3 Промислове освітлення

Для приміщення висотою до 6 м, в якому знаходиться установка, передбачено природне та штучне освітлення. Для штучного освітлення найбільш підходять лампи денного освітлення типу ЛД, що мають більшу світову віддачу та більший термін використання (812 тис. год.). Світильники штучного освітлення мають бути розташовані так, щоб забезпечувались надійність їх закріплення, безпечність, зручність обслуговування і необхідне освітлення з урахуванням його рівномірності.

У всіх виробничих приміщеннях має бути передбачено робоче і аварійне освітлення. Аварійне освітлення має забезпечувати спостереження за роботою під час раптового відключення робочого освітлення. Для внутрішнього освітлення апарату під час його огляду і ремонту необхідно використовувати переносні світильники у вибухозахищеному виконанні напругою не більше 12 В, захищені металевою сіткою.

Для освітлення приміщення використовуються люмінесцентні лампи низького тиску:

- тип лампи: ЛД 80;
- потужність: 80 Вт;
- кількість: 9 шт.;
- довжина: 1514,2 мм;

- діаметр: 40 мм;
- потік: 3865 лм.

Мінімальна освітленість для ламп типу ЛД 80, лк:

$$E = \frac{N \cdot F \cdot n}{S \cdot k \cdot z} = \frac{9 \cdot 3865 \cdot 0,42}{32 \cdot 1,8 \cdot 1,18} = 215 \text{ лк.} \quad (6.1)$$

де F – потік лампи у світильнику, лм; k – коефіцієнт запасу; S – площа приміщення, м^2 ; z – відношення середньої освітленості до мінімальної; N – кількість світильників, шт; n – використання світлового потоку у частках одиниці.

На проєктованій ділянці передбачене також природне бічне освітлення.

Таким чином приміщення відповідає нормам освітленості для даного обладнання та відноситься до четвертого розряду зорових робіт. Відповідно до ДСН В.2.5-28-2006 [55] нормоване значення освітлення при коефіцієнті запасу $k = 1,8$ відповідає оптимальному значенню для даного розряду.

6.4 Електробезпека

Установка для виготовлення виробів з армованого полімеру буде знаходитись в сухому приміщенні з нормальною температурою та вологістю повітря. Підлога приміщення залізобетонна. За класифікацією приміщень за ступенем небезпеки ураження електричним струмом приміщення, де встановлена дана установка відноситься згідно ПУЕ до класу приміщень з підвищеною небезпекою.

Для електроживлення використовується трифазна напруга 220/380 В з частотою 50 Гц з глухозаземленою нейтраллю.

Причини ураження обслуговуючого персоналу електричним струмом можуть бути такими:

- помилкове включення установки;
- замикання на корпусі;
- випадки дотику людей до відкритих струмопровідних частин, наконечників струмопідводів;

- старіння ізоляції і, як наслідок, втрата ізоляційних властивостей;
- дотик до частин установки, що можуть опинитися під напругою у випадку короткого замикання.

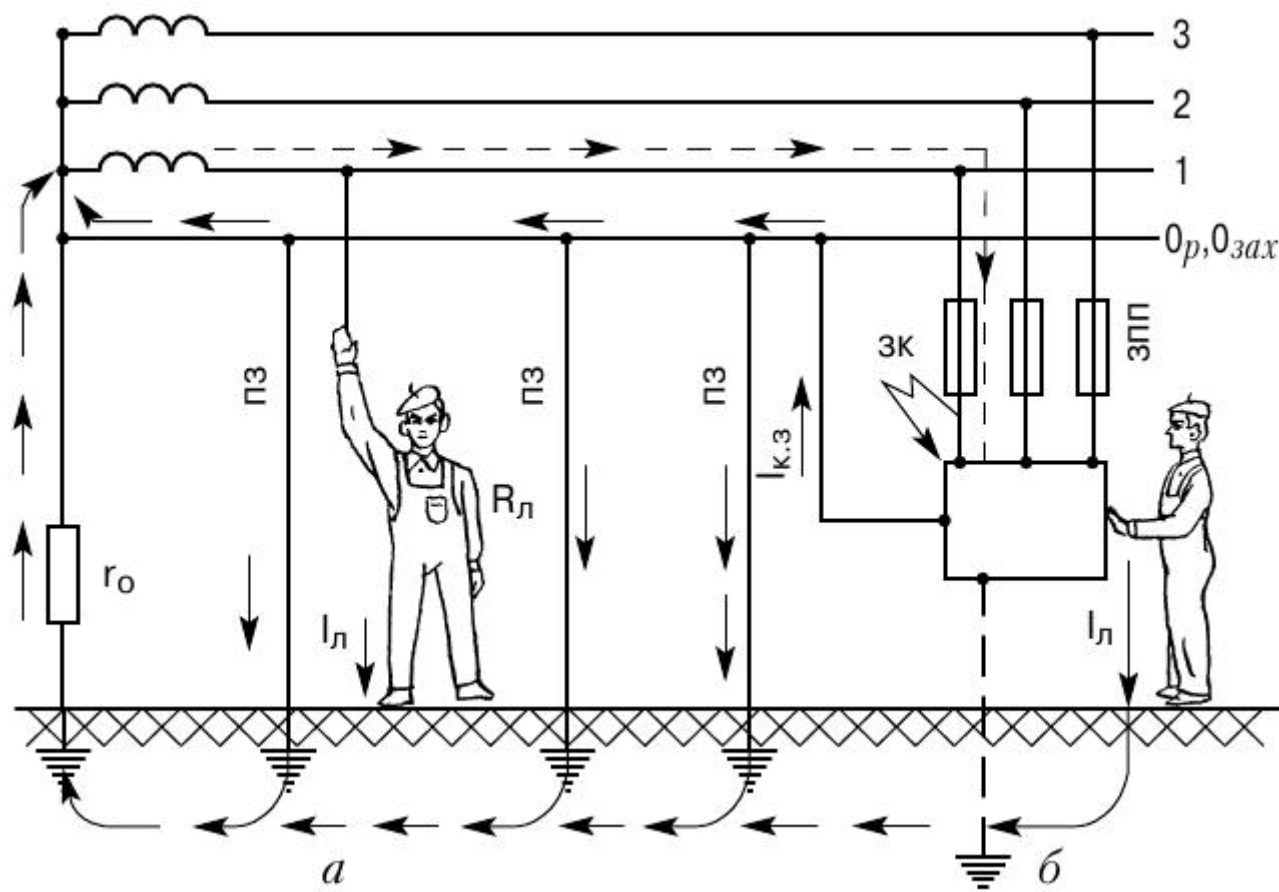
Для забезпечення електробезпечності передбачені організаційні і технічні заходи:

- інструктаж і навчання безпечним методам праці;
- установлення плакатів і знаків безпеки (на небезпечних місцях – джерелах живлення, на регуляторах і т. ін.);
- ізоляція струмоведучих частин;
- встановлення попереджувальної сигналізації, блокувань;
- використання електрозахистних засобів та інструментів з ізолюючими ручками;

Для аварійного режиму передбачені наступні заходи:

- захисне занулення (рисунок 6.1);
- захисне відключення;

В трифазній чотирипровідній мережі з глухозаземленою нейтраллю при дотику людини до корпусу електрообладнання, який знаходиться під напругою в результаті замикання на корпус (рисунок 6.1 б), виникає, практично, така сама мережа струму замикання на землю, як і у випадку, наведеному на рисунку 6.1 а [56]. При пробі на корпус струм швидко зростає, через що відбудеться автоматичне відключення печі.



a – доторкання людини до фазного проводу при непошкодженій ізоляції інших фазних проводів; *б* – доторкання людини до корпусу споживача електроенергії при пошкодженні ізоляції та переході напруги на неструмовідні частини за відсутності доторкання людини у лівій частині

Рисунок 6.1 – Схема трьохфазної чотирипровідної мережі з глухо заземленою нейтраллю

Під час ремонту використовують переносний електричний інструмент 42 В, та інструмент постійного струму не більше 110 В

6.5 Пожежна безпека

Основним джерелом горіння в даному приміщенні є ізоляція на струмоведучих частинах. Приміщення, де знаходиться виготовлення виробів з

армованого полімеру, відноситься відповідно до ОНТП 24-86 [57] за пожежною безпекою до категорії *B*.

Серед причин, що викликають загорання, найбільше ймовірними є:

- несправність електроустаткування;
- струм короткого замикання і перевантаження кабелів живлення;
- загорання ізоляції електропроводів;
- використання вогню в неналежному місці;
- пряме враження блискавкою, що може викликати пожежу і зробити руйнацію будинків;
- іскри при електро- і газозварочних роботах.

Засоби запобігання виникненню пожежі:

- дотримання технологічних норм і правил експлуатації;
- обмеження в застосуванні відкритого вогню;
- паління тільки у відведених для цього місцях;
- своєчасне проведення інструктажу з техніки безпеки серед обслуговуючого персоналу;
- наявність засобів сигналізації, зокрема, системи електричної пожежної сигналізації (ЕПС) і засобів оперативного зв'язку з пожежною частиною;
- наявність засобів пожежогасіння в безпосередній близькості від установки (пісок, вогнегасники).

Для гасіння невеликих ділянок загорання при виключеному та включеному електроустаткуванні застосовують вуглекислотні вогнегасники ОУ-5 (2 шт.) та установка пожежогасіння порошкова закачана типу «САМ-3» (2 шт.). Засоби пожежогасіння, що застосовуються у приміщенні, показані на рисунку 6.2. Також використовуються пожежні рукави Ф-77. Фарбування первинних засобів гасіння пожежі та їх розташування виконуються згідно вимог ГОСТ 12.4.026-76 [52].



а



б

а – вогнегасник ОУ-5; *б* – установка пожежогасіння САМ-3

Рисунок 6.2 – Засоби пожежогасіння, що застосовуються у приміщенні

Для захисту органів дихання і зору від впливу високотоксичного газового середовища при виконанні рятувальних і технічних робіт використовують повітряний апарат МПА-2×30. Може бути застосований при виконанні різних нетривалих робіт при огляді запірного устаткування, ліквідації витоків газу і шкідливих рідин. Має полегшену підвіску, що дозволяє застосовувати його як у положенні на спині, так і в положенні на поясі. Наявність візуального і звукового контролю залишку повітря в балоні, а також надлишковий тиск під маскою підвищують безпеку використання апарата в аварійних умовах.

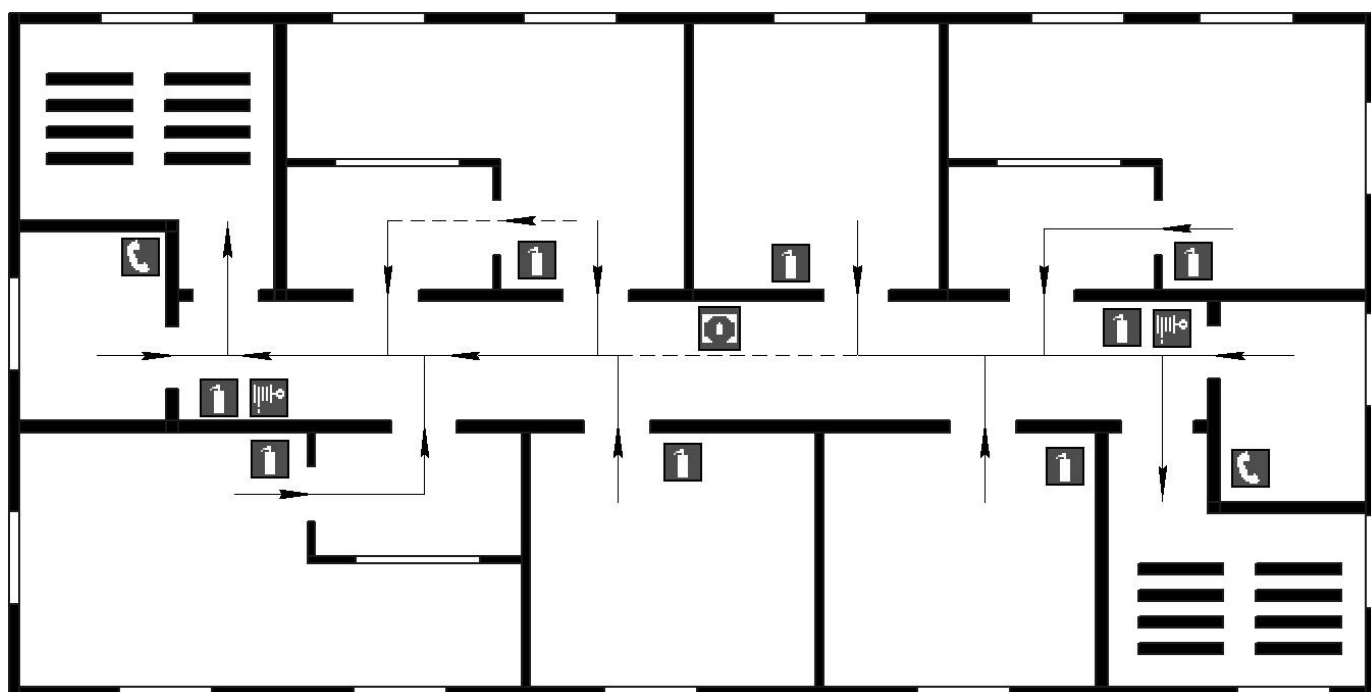
Таблиця 6.1 – Технічна характеристика повітряного апарату МПА-2×30

Місткість балона, л	2
Тиск у балоні, МПа	30
Номінальний ЧЗД, хв	18
Кількість балонів, шт.	1

Габаритні розміри, мм	450×220×170
Маса апарату, кг	5,4

В приміщенні на відстані 30 метрів одне від одного повинні бути встановлені пожежні гідранти з рукавами довжиною до 10 метрів. Відстань до пожежного виходу повинна бути не більше 40 метрів. Кількість виходів – не менше двох. Ширина дверей евакуиходу – 2 метри. Двері евакуиходу повинні відкриватись на зовні.

План евакуації на випадок надзвичайної ситуації (НС) зображений на рисунку 6.3.



Умовні позначення

- | | |
|---|--|
| <p>— основний шлях евакуації;</p> <p>— запасний шлях евакуації;</p> <p>— вогнегасник;</p> <p>— пожежний кран;</p> | <p>— телефон для повідомлення про пожежу;</p> <p>— ручний пожежний повідомлювач.</p> |
|---|--|

Рисунок 6.3 – План евакуації на випадок НС

6.7 Висновок щодо виконання вимог охорони праці у виробничому приміщенні

- 1 Робота установки для виготовлення виробів з армованого полімеру допускається при наявності в цеху вентиляції і пристроїв для видалення і нейтралізації шкідливих речовин, що виділяються при переробці вихідної сировини.
- 2 Перед початком роботи установки необхідно перевірити її функціональний стан.
- 3 Шафа керування установкою закрита.
- 4 Робота в спецодязі.
- 5 На випадок можливого самозаймання передбачені засоби гасіння.
- 6 Не дозволяється користуватися інструментом, пристосуваннями, устаткуванням, поведження з якими працівник не навчений.
- 7 Працівник повинен виконувати вимоги з охорони праці, правила електро — та пожежної безпеки, правила внутрішнього трудового розпорядку, правила поведінки на території організації, у виробничих, допоміжних і побутових приміщеннях.
- 8 Палити дозволяється тільки в спеціально встановлених місцях.
- 9 Перед початком і в процесі роботи слід періодично перевіряти зовнішнім оглядом (відсутність звисаючих та оголених проводів) і з допомогою приладів справність електропроводки, надійність заземлюючих сполук виробничого обладнання (відсутність обривів, міцність контакту між корпусом обладнання і заземлюючим проводом).
- 10 Включити вентиляцію. Забруднене повітря при видаленні не повинен проходити через зону дихання працівника. Місцеві відсмоктувачі, парасольки і укриття повинні надійно кріпитися і не створювати незручностей працівникам. Вентиляційний агрегат повинен бути заблокований з приводів

технологічного обладнання конструктивно пов'язаного з ним і виключати пуск і роботу устаткування при непрацюючому вентиляційному агрегаті.

11 Забороняється у виробничих приміщеннях застосування побутових та саморобних електронагрівальних приладів.

12 Під час роботи категорично заборонено:

- проводити ремонтні роботи;
- торкатися до металевих частин установки.

Відповідно до закону про охорону праці і національної програми по охороні праці, виробничі будівлі, споруди, устаткування, технологічні процеси повинні відповідати вимогам, що забезпечують безпечні умови праці.

7 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

7.1 Ідея стартап проекту

Створення заводу по виробництву міцних чохлів для смартфонів та інших гаджетів. Планується відкрити завод, який буде виготовляти чохли для різних гаджетів, насамперед смартфонів.

Проблема всіх сучасних телефонів – захист екрану та інших частин гаджетів, зокрема смартфонів (надалі – гаджети). У буденному житті ми бачимо багато людей, які ходять з телефонами у яких розбитий екран, тріснутий корпус, подряпини і т.д. Інколи це може не впливати на функціонування гаджетів, але частіше це призводить до часткової або повної відмови функціонування елементів системи.

Наша ідея заключається у тому, щоб виготовляти такі чохли для гаджетів, які будуть надійно захищати пристрої від дощу, пилу, царапин, падінь з висоти до 2 метрів (можливо, трохи більше).

7.2Цільова аудиторія, клієнт

Майже всі люди на планеті, які користуються смартфонами, планештами та іншими гаджетами.

7.3Конкуренти

Підприємства та компанії по створенню чохлів, такі як Urban, Vellini, Promate

7.4Основна конкурентна перевага

- Не потрібно додатково купляти захисне скло

- Можливість виготовити чохол «під себе»
- Зручна доставка завдяки поштовим службам або самовивіз.

7.5 Бюджет

1 Оренда приміщення 10 тис. грн.

2 Станок для виготовлення чохлів з можливістю підключення до комп'ютера – 40 тис. грн

3 Персональний комп'ютер – близько 22 тис. грн.

4 Пристрої та прилади з'єднань та підключень – 3 тис. грн.

5 Заробітна плата на найближчі 5 місяців – 40 тис. грн.

6 Непередбачені витрати – 40 тис. грн.

7 Реклама – 10 тис. грн.

Також бажано врахувати організаційні витрати, витрати на документацію та випробування – приблизно 5 тис. грн..

Тоді, сумарна вартість запуску проекту складе 150 тис. грн.

7.6 Динаміка ринку за останні 5-8 років

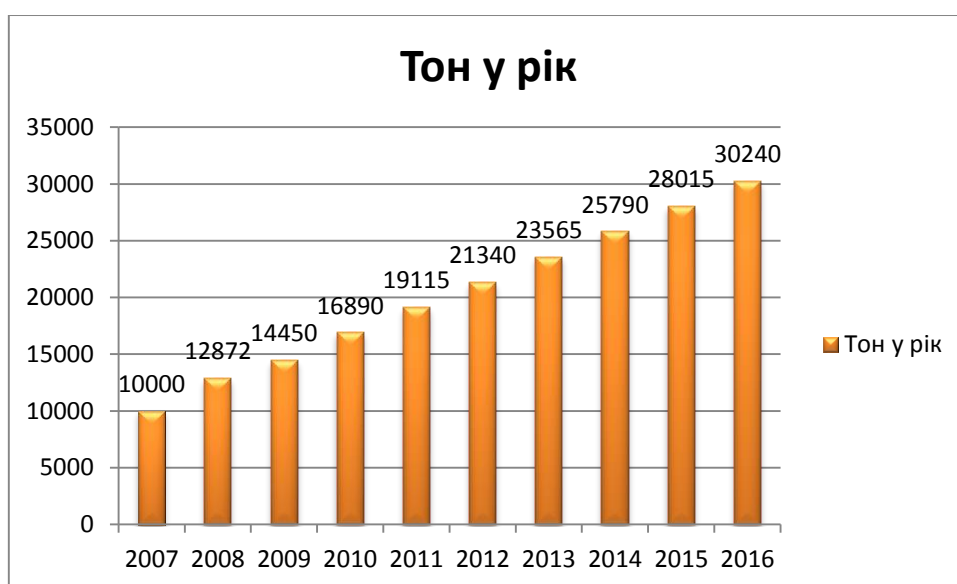


Рисунок 7.1 — динаміка ринку за останні 10 років

7.2 Етап життєвого циклу нашого ринку та актуальність стартапу

Життєвий цикл - це концепція, яка описує збут товару, прибуток, поведінка споживачів з моменту виведення товару на ринок до його відходу з ринку.

На даному етапі життєвого циклу наш ринок знаходиться на етапі зростання.

Враховуючи вище написані факти і доводи, можна сказати, що наш стартап-проект дуже актуальний сьогодні, адже динаміка ринку постійно збільшується, ринок поки не надто переповнений. Наша продукція актуальна сьогодні, адже у побуті дуже часто гаджети розбиваються та отримують деформації, але використовуючи наш продукт є можливість позбутися таких проблем.

Джерела:

<http://infokluch.com.ua/ua/news/1745.html>

http://www.marketing.net.ua/view_subsects.php?num=75

7.3 Ресурси

7.3.1 Виробничі та складські потужності

Оренда (а з часом і покупка) місця, де колись був потужний завод на якому можна буде встановити обладнання.

7.8.2 Програмне забезпечення

Пріоритетним є максимальне використання комп'ютерних технологій та поєднання пристроїв українського походження у симбіозі з імпортом

7.8.3 Маркетингові

Завести сайт, розкрутити через соціальні мережі, повісити оголошення на стендах різних міст неподалік до підприємств, дати оголошення у мережеві дошки оголошень, проведення краш тестів продукції та висвітлення це на ютуб.

7.8.4 Трудові

Кваліфікований персонал. Можливе поєднання з випускниками та студентами ВНЗ України.

7.8.5 Правові

Забезпечення трудової бази, офіційного працевлаштування, обов'язкового страхування, соц. пакету.

7.9 Аналіз факторів макромаркетингового середовища

Таблиця 7.1 – Підсумкова таблиця факторів політико-правового середовища

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Політико-правове середовище країни-партнера	Продаж товару за кордон	Відносини між країнами	Необхідність закупки компонентів для виготовлення товару з різних країн
Зовнішня політика країни	Продаж товару за кордон	Відносини між країнами	Необхідність реалізації товару в різних країнах
Зовнішня політика країни	Закупівля компонентів для виготовлення товару	Відносини між країнами	Необхідність закупки компонентів для виготовлення товару з різних країн

Таблиця 7.2 – Підсумкова таблиця факторів економічного середовища

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Рівень розвитку виробництва		Обладнання, не дає можливості збільшення обсягу виробництва	Підписання контрактів на вироблення електродної продукції виробниками
Конкуренти, які створюють дешевшу продукцію		Створення нової економічно вигідної продукції	Розроблення системи знижок для компаній-партнерів
Відсутність опалення через аварії на ТЕЦ		Неможливість працівникам працювати	Встановлення автономного опалення

Таблиця 7.3 – Підсумкова таблиця факторів науково-технічного середовища

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Конкуренти, які створюють продукцію новітніми технологіями		Створення нової економічно вигідної продукції	Розробка систем контрактів з найбільшими торговими точками з вигідною взаємною рекламою та програмою лояльності за довготривалу співпрацю

Таблиця 7.4 – Підсумкова таблиця факторів демографічного середовища

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Відсутні			

Таблиця 7.5 – Підсумкова таблиця факторів природного середовища

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Відсутність опалення через аварії на ТЕЦ		Неможливість працівникам працювати	Встановлення автономного опалення
Погана погода		Неможливість транспортування	Окремі пункти у договорі про можливі додаткові дні поставок у зв'язку з погодними умовами

7.10 Аналіз факторів мікрорекетингового середовища

Таблиця 7.6 – Підсумкова таблиця впливу споживачів

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Ціна більша за середню		Люди будуть брати дешевшу продукцію	1. Розробка систем знижок 2. Проведення демонстрацій і «чорної реклами», де буде показана вища якість 3. Вірусні відео на ютубі з краш тестом

Таблиця 7.7 – Підсумкова таблиця впливу конкурентів

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Ціна вища ніж у конкурентів		Люди не будуть купляти товар	1.Розробка систем знижок 2. Проведення демонстрацій і «чорної реклами», де буде показана вища якість 3. Вірусні відео на ютубі з краш тестом
Використання нових технологій		Продукція конкурентів буде більш якісна	Постійний обмін досвідом з науковими-дослідними інститутами; Премії за нововведення;

Таблиця 7.8 – Підсумкова таблиця впливу постачальників

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Постачання не в термін		Замовлення будуть виготовлені не вчасно	Замовлення деяких запчастин наперед; давати зазор на час виготовлення
Постачання не якісної продукції		Якість систем	Встановлення штрафів постачальникам за брак

		керування не відповідати ме завданій	продукції
--	--	---	-----------

Таблиця 7.9 – SWOT- аналіз

<i>Сильні сторони</i>	<i>Слабкі сторони</i>
<ul style="list-style-type: none"> - Надійна продукція - Контракти з торговими точками 	<ul style="list-style-type: none"> - Ціна вища ніж у конкурентів - Конкуренти, які створюють продукцію новітніми технологіями, бренди
<i>Можливості</i>	<i>Загрози</i>
<ul style="list-style-type: none"> - Заощадження на зарплаті - Брати студентів на роботу 	<ul style="list-style-type: none"> - Люди не будуть купляти товар - Зниження якості роботи - Збільшення часу виготовлення продукції

Висновки

- 1) Розроблено Стартап-Проект, об'єктом якого є розробка чохла для смартфонів з полімерних матеріалів, армованих природними волокнами.
- 2) Визначені цільова аудиторія, конкуренти та конкурентна перевага.
- 3) Зроблено бюджет та визначено ресурси на заснування Старту.
- 4) Наведено SWOT- аналіз.

ВИСНОВКИ

Головним результатом магістерської дисертації є вирішення важливої науково-технічної задачі з дослідження ефективних механічних властивостей нових композитних полімерів залежно від матеріалів матриці й армувального волокна природного походження та його об'ємного вмісту в композиті, що забезпечує заощадження матеріальних ресурсів та зменшення техногенного впливу на довкілля.

- 1) На підставі літературного огляду стану питання теоретично-експериментального дослідження полімерних композитних матеріалів армованих природним волокном обґрунтовано доцільність розробки нових полімерних композитів та визначення їх ефективних механічних властивостей з метою хастосування у пакувальній галузі.
- 2) Сформульовано математичні моделі задач напружено-деформованого стану під час випробування зразків армованих полімерів у наближеннях ізотропного та ортотропного середовищ.
- 3) Розроблено алгоритм визначення ефективних значень механічних характеристик армованих полімерів за допомогою розв'язання задач НДС для композитів з ортотропними властивостями. На базі МСЕ розроблено числову методику розв'язання задач НДС в наближеннях ізотропного та ортотропного середовищ.
- 4) Розроблено ПЗ для розв'язання задач НДС в наближеннях ізотропного та ортотропного середовищ на базі методу скінченних елементів з використанням системи Mathcad. Створено числові моделі НДС в наближеннях ізотропного та ортотропного середовищ для теоретичного випробування зразків полімерного композиту на розтяг з геометричними характеристиками за стандартом ASTM D638.
- 5) Виконано верифікацію розроблених числових моделей за даними числових експериментів, отриманих за допомогою ANSYS Mechanical APDL. Встановлено, що різниця між результатами розрахунків не перевищує 3,8 %, що є цілком прийнятним для проведення інженерних розрахунків з метою

визначення ефективних значень механічних властивостей армованих полімерів.

- 6) Визначено ефективні ортотропні механічні властивості композитних полімерів (ПВТ, ПНТ, ПП і ПС), армованих природними волокнами (кокос, бавовна, банан, конопля і льон), з використанням аналітичних співвідношень та результатів числового моделювання НДС.
- 7) Встановлено, що: найвищі значення механічних властивостей спостерігаються у разі використання волокна банану, льону та коноплі, зокрема, модуль пружності за напрямком волокна становить більше ніж 8 ГПа, а границя міцності – більше ніж 290 МПа, що перевищує міцність Ст. 3 (230 МПа).
- 8) Показано, що у разі наявності достатньої адгезії між фазами полімерного композиту і контакт між ними наближається до абсолютного похибка застосування аналітичних співвідношень для визначення ефективних механічних властивостей композиту не перевищує 2,1 %, що цілком достатнім для виконання інженерних розрахунків на міцність. Е випадку відсутності достатньої адгезії між фазами полімерного композиту і силова взаємодія між ними наближається до нуля похибка застосування аналітичних співвідношень для визначення ефективних механічних властивостей композиту перевищує 90 % для модуля пружності, що яскраво свідчить про неможливість застосування адитивних співвідношень для визначення механічних властивостей полімерів у разі недостатньої адгезії між полімером та волокном.
- 9) За результатами наукових досліджень магістерської дисертації отримано патент України [38], що включає спосіб пакування лікарських пігулок, зокрема, з використанням армованих природним волокном полімерів.
- 10) Розроблено числову модель НДС полімерної пляшки для випробування під надлишковим тиском. Встановлено, що у разі використання армованого природним волокном полімеру для виготовлення пляшок запас міцності зростає до більше ніж 15, що дає змогу зменшити товщину стінки пляшки з 3 мм до 1 мм. При цьому запас міцності буде становити понад 6.

- 11) Використання пляшок, виготовлених з композитних полімерів, армованих природними волокнами, що відносяться до відновлювальної сировини, одночасно вирішує дві проблеми: перша стосується підвищення міцності, що забезпечує ресурсозбереження, а друга стосується можливості природного розкладання після використання тари під дією сил навколишнього середовища.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Полимерные композиционные материалы (часть 1): учеб. пособ. / Л.И. Бондалетова, В.Г. Бондалетов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 118 с.
2. Микуленок И.О. Классификация термопластических композиционных материалов и их наполнителей [Текст] / И. О. Микуленок // Пластические массы. – 2012. – № 9. – С. 29-38.
3. Микулёнок И.О., Радченко Л.Б. Полимерные композитные материалы и изделия из них. Получение, переработка и свойства: терминолог. слов. К.: ИВЦ „Издательство «Политехника»”, 2005. – 179 с.
4. Основы технологии переработки пластмасс / С.В. Власов, Э.Л. Калинин, Л.Б. Кандырин и др.; под ред. В.Н. Кулезнёва и В.К. Гусева. М.: Химия, 1995. – 528 с.
5. Принципы создания композиционных полимерных материалов / А.А. Берлин, С.А. Вольфсон, В.Г. Ошмян, Н.С. Ениколопов. М.: Химия, 1990. 240 с.
6. Симонов-Емельянов И.Д., Кулезнёв В.Н. Основы создания композиционных материалов. М.: МИХМ, 1986. – 86 с.
7. Jones, Robert M. Mechanics of composite materials: 2nd ed. / Robert M. Jones. Philadelphia : Taylor & Francis, 1999. — 519 p.
8. Наполненные термопласты: справочник / В.А. Пахаренко, В.Г. Зверлин, Е.М. Кириенко; под общ. ред. акад. Ю.С. Липатова. К.: Техніка, 1986. – 182 с.
9. Головкин Г.С. Волоконная технология производства и переработки в изделия термопластичных композиционных материалов // Пластические массы. 2003. № 9. – С. 35–39.
10. Кербер М.Л., Кравченко Т.П. Термопластичные композиционные материалы для автомоби-лестроения // Пластические массы. 2000. № 9. – С. 46–48.

11. Барштейн Г.Р. Сабсай О.Ю. Технологические свойства термопластов с минералоорганическими наполнителями: обзор. информ. – М.: НИИТЭХИМ, 1988. – 43 с. (Серия «Переработка пластмасс»).
12. Thermoplastic polymers reinforced with fibrous agricultural residues. Georgopoulos S. Th., Taran-tili P. A., Avgerinos E., Andreopoulos A. G., Koukiosk E. G. // *Polym. Degrad. and Stab.* – 2005. – Vol. 90, N 2. – С. 303–312.
13. Новые решения в технологии изготовления препрегов. Режим доступа: <https://viam.ru/public/files/2011/2011-205812.pdf>
14. Advanced materials for aircraft interiors // *Composites Word.* – 2006. – № 11. – P. 1–3.
15. Thompson, M., & Thompson, J. (2017). *ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis*. 1st ed. Oxford: Butterworth-Heinemann. – 462 p.
16. Saheb N. D. & Jog J. P., *Adv. Polym. Tech.*, 18 (1999) – 351.
17. Groover M. P., *Fundamental of Modern Manufacturing*. (John Wiley & Sons, Hoboken, NJ), 2010. – 200.
18. Malkapuram R., Kumar V. & Yuvraj S. N., *J. Reinf. Plastic Comp.*, 28 (2008). – 1169.
19. Li X., Tabil L. G., Panigrahi S. & Crerar W. J., *Can. Bio Syst. Eng.*, 8 (2009). – 1.
20. Ku H., Wang H., Pattarachaiyakoo N. & Trada M., *Composites Part B*, 42 (2011). – 856.
21. Theoretical Prediction on the Mechanical Behavior of Natural Fiber Reinforced Vinyl Ester Composites / S. Ramakrishnan, K. Krishnamurthy, M. Mohan Prasath, R. Sarath Kumar, M. Dharmaraj, K. Gowthaman, P. Sathish Kumar, R. Rajasekar // *Applied Science and Advanced Materials International*. – Vol. 1 (3), 2015. – P. 85–92.
22. Фомин В.А., Гузеев В.В. Биоразлагаемые полимеры, состояние и перспективы развития // *Пластические массы*. 2001. № 2. – С. 42–46.

23. Основные направления в области создания биоразлагаемых термопластов / С.П. Рыбкина, В.А. Пахаренко, Т.С. Шостак, В.В. Пахаренко // Пластические массы. 2008. № 10. – С. 47–54.
24. Bongarde U. S. & Shindle V. D., Int. J. Eng. Sci. Innovat. Tech., 3 (2014) 431.
25. Verma D., Gope P. C., Shandilya A., Gupta A. & Maheshwari M. K., Mater Environ. Sci., 4 (2013). – 263.
26. Abilashand M. N.. Sivapragash, Int. J. Appl. Innov. Eng. Management, 2(1) (2013). – 53.
27. ASTM D638. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. URL: <https://www.astm.org/Standards/D638.htm> (last access: 04.12.2017).
28. Карвацький А.Я. Механіка суцільних середовищ [Текст]: навч. посіб. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. – 292 с. Гриф – рекомендовано Вченою радою НТУУ «КПІ» (Протокол № 11 від 07.11.2016 р.)
29. Механіка суцільних середовищ – 1. Механіка суцільних середовищ в інженерних розрахунках [Електронний ресурс]: Текст лекцій для студентів спеціальності «Галузеве машинобудування», спеціалізації «Інжиніринг, обладнання та технології виробництва полімерних та будівельних матеріалів і виробів» / Уклад.: О. С. Сахаров, А. Я. Карвацький – К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 233 с. – іл. – Бібліогр.: с. 124–126.
30. Числова модель напружено-деформованого стану для дослідження міцності армованих полімерів / В.О.Караулова, А.Я.Карвацький, І.О. Мікульонок // VI Всеукраїнська науково-практична конференція : Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки, 14-15 грудня 2017 р., Київ. — К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. — С. 59–61.
31. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич ; пер. с англ. ; под ред. Б. Е. Победри. — М. : Мир, 1975. — 541 с.
32. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд ; пер. с англ. А. А. Шестакова ; под ред. Б. Е. Победри. — М. : Мир, 1979. — 392 с.

33. Карвацький А.Я. Метод скінченних елементів у задачах механіки суцільних середовищ. Програмна реалізація та візуалізація результатів [Текст]: навч. посіб. – К.: НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка», 2015. – 392 с. Гриф надано Вченою радою НТУУ «КПІ» (Протокол № 4 від 12.05.2015 р.)
34. Gmsh. a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. [Electronic resource]. – Access mode: <http://geuz.org/gmsh/>.
35. Mathcad. Engineering math software that allows perform, analyze, and share your most vital calculations [Electronic resource]. – (<http://www.ptc.com/engineering-math-software/mathcad/>).
36. ParaView. An open-source, multi-platform data analysis and visualization application [Electronic resource]. – (<http://www.paraview.org/>).
37. Tecplot. Master the view. [Electronic resource]. Режим доступу: <http://www.tecplot.com/>.
38. Пат. 118275 У Україна, МПК (2006.01) B65D 83/04. Пакування / І. О. Мікульонюк, А. Я. Карвацький, В. О. Караулова ; заявники і патентовласники — вони же. — № u201702619; заявл. 21.03.2017 ; опубл. 25.07.17, Бюл. № 14. — 2 с.
39. Испытательная машина Delta для стеклянных и ПЭТ-бутылок. [Electronic resource]. Режим доступу: http://unilab.kiev.ua/delta_5_spez_oboryd.html.
40. Прохоренко В. П. SolidWorks. Практическое руководство / В. П. Прохоренко. — М. : ООО Бином-Пресс, 2004. — 448 с.
41. SolidWorks 2010. Расширенное моделирование деталей. Dassault Systemes SolidWorks Corporation 300 Baker Avtnue, Concord, Massachusetts USA. – 328 p.
42. ANSYS Workbench. [Electronic resource]. Режим доступу: <https://cae-expert.ru/product/ansys-workbench>.
43. Полиэтилен: основные свойства и области применения. [Electronic resource]. Режим доступу: <http://poltavhim.pl.ua/refernce/13-polyethylene.html>.
44. Полипропилен (ПП) : основные свойства, область применения. [Electronic resource]. Режим доступу: <https://plastinfo.ru/information/articles/52>.

45. Свойства полистирола и его сополимеров. Применение в упаковке. [Electronic resource]. Режим доступа: <https://ref.unipack.ru/34/>.
46. Основные механические и тепловые свойства веществ и материалов. [Electronic resource]. Режим доступа: <http://khd2.narod.ru/info/datamech.htm>.
47. Мікульонок І.О., Карвацький А.Я., Караулова В.О. Тверді гетерогенні системи (до питання термінології) // Упаковка. – 2018. – № 3. – С. (подана)
48. Карвацький А.Я., Мікульонок І.О., Караулова В.О. Механічні властивості армованих полімерних матеріалів для виготовлення тари та упаковки // Упаковка. – 2018. – № 4. – С. (подана)
49. Закон України “Про охорону праці” [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://www.rada.gov.ua>.
50. Строительные нормы и правила: СНиП 2.04.05 91. Отопление, вентиляция и кондиционирование [Текст]: нормативно-технический материал. — Москва: 1987. — 82 с.
51. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень ДСН 3.3.6.042-99, постанова № 42. — К.: 1999. — 9 с.
52. ГОСТ 12.1.005-88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. — Москва: Изд-во стандартов, 1989. — 48 с.
53. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку ДСН 3.3.6.037-99, постанова № 37. — К.: 1999. — 15 с.
54. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації ДСН 3.3.6.039-99, постанова № 39. — К.: 1999. — 39 с.
55. Природне і штучне освітлення ДСН В.2.5-28-2006, постанова № 168. — К.: 2006. — 78 с.
56. Основи охорони праці: Підручник. 2-ге видання, доповнене та перероблене. / К.Н. Ткачук, М.О. Халімовський, В.В. Зацарний [та ін.]. За ред. К.Н. Ткачука і М.О. Халімовського. — К.: Основа, 2006 — 448 с.
57. Общесоюзные нормы технологического проектирования: ОНТП 24 86. Определение категории помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности. — Москва: 1986. — 14 с.

58. Наказ «Про затвердження Правил охорони праці на підприємствах з виробництва пластмасових виробів» від 11 жовтня 2013 р.

Додаток А Текст програмному коду для побудови геометрії в програмі Gmsh

```
// ініціалізація змінних
```

```
x1 = 0.0;  
y1 = 0.0;  
z1 = 0.0;  
x2 = 0.0;  
y2 = 0.019;  
x3 = 0.0328576;  
y3 = 0.019;  
x4 = 0.0380507;  
y4 = 0.0176924;  
x5 = 0.0433229;  
y5 = 0.0167537;  
x6 = 0.0486482;  
y6 = 0.0161887;  
x7 = 0.054;  
y7 = 0.016;  
x8 = 0.111;  
y8 = 0.016;  
x9 = 0.116352;  
y9 = 0.0161887;  
x10 = 0.121667;  
y10 = 0.0167537;  
x11 = 0.126949;  
y11 = 0.0176924;  
x12 = 0.132142;  
y12 = 0.019;  
x13 = 0.165;  
y13 = 0.019;  
x14 = 0.165;  
y14 = 0.0;  
x15 = 0.132142;  
y15 = 0.0;  
x16 = 0.126949;  
y16 = 0.0013076;  
x17 = 0.121667;  
y17 = 0.00224626;  
x18 = 0.116352;  
y18 = 0.00281133;  
x19 = 0.111;  
y19 = 0.003;  
x20 = 0.054;  
y20 = 0.003;
```

```

x21 = 0.0486482;
y21 = 0.00281133;
x22 = 0.0433229;
y22 = 0.00224646;
x23 = 0.038057;
y23 = 0.0013076;
x24 = 0.0328576;
y24 = 0.0;
cl = 0.00266*1.0;

```

```
// точки
```

```

Point(1) = {x1, y1, z1, cl};
Point(2) = {x2, y2, z1, cl};
Point(3) = {x3, y3, z1, cl};
Point(4) = {x4, y4, z1, cl};
Point(5) = {x5, y5, z1, cl};
Point(6) = {x6, y6, z1, cl};
Point(7) = {x7, y7, z1, cl};
Point(8) = {x8, y8, z1, cl};
Point(9) = {x9, y9, z1, cl};
Point(10) = {x10, y10, z1, cl};
Point(11) = {x11, y11, z1, cl};
Point(12) = {x12, y12, z1, cl};
Point(13) = {x13, y13, z1, cl};
Point(14) = {x14, y14, z1, cl};
Point(15) = {x15, y15, z1, cl};
Point(16) = {x16, y16, z1, cl};
Point(17) = {x17, y17, z1, cl};
Point(18) = {x18, y18, z1, cl};
Point(19) = {x19, y19, z1, cl};
Point(20) = {x20, y20, z1, cl};
Point(21) = {x21, y21, z1, cl};
Point(22) = {x22, y22, z1, cl};
Point(23) = {x23, y23, z1, cl};
Point(24) = {x24, y24, z1, cl};

```

```
// лінії
```

```

Line(1) = {1, 2};
Line(2) = {2, 3};
Line(3) = {3, 4};
Line(4) = {4, 5};
Line(5) = {5, 6};
Line(6) = {6, 7};
Line(7) = {7, 8};
Line(8) = {8, 9};

```

```

Line(9) = {9, 10};
Line(10) = {10, 11};
Line(11) = {11, 12};
Line(12) = {12, 13};
Line(13) = {13, 14};
Line(14) = {14, 15};
Line(15) = {15, 16};
Line(16) = {16, 17};
Line(17) = {17, 18};
Line(18) = {18, 19};
Line(19) = {19, 20};
Line(20) = {20, 21};
Line(21) = {21, 22};
Line(22) = {22, 23};
Line(23) = {23, 24};
Line(24) = {24, 1};

// замкнутий контур
Line Loop(24) =
{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23
,24};

// поверхня
Plane Surface(1) = {24};

// витягування
Extrude {0, 0, 0.003} { Surface{ 1 }; }

```

**Додаток Б Механічні властивості композитних полімерів, армованих
волокном природного походження**

Таблиця Б.1 – Ортотропні механічні властивості полімерного композита (ПВТ +
кокосове волокно) залежно від об'ємного вмісту армувального матеріалу

№	Склад композиту, F	$[\sigma_{TS}]_1$, МПа	$[\sigma_{TS}]_2$, МПа	$[\sigma_{TS}]_3$, МПа	E_1/G_{12} , ГПа	E_2/G_{23} , ГПа	E_3/G_{13} , ГПа	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}
1	Polyethylene HP + Coir 10 %, $F=1,102$ кН	28,25	11,595	11,595	0,661/ 0,230	0,259/ 0,091	0,259/ 0,090	0,435	0,429	0,435
2	Polyethylene HP + Coir 20 %, $F=1,794$ кН	46	12,944	12,944	1,087/ 0,383	0,289/ 0,103	0,289/ 0,102	0,42	0,409	0,42
3	Polyethylene HP + Coir 30 %, $F=2,486$ кН	63,75	14,649	14,649	1,514/ 0,539	0,327/ 0,118	0,327/ 0,116	0,405	0,391	0,405
4	Polyethylene HP + Coir 40 %, $F=3,178$ кН	81,5	16,872	16,872	1,94/ 0,698	0,377/ 0,137	0,377/ 0,136	0,39	0,375	0,39

Таблиця Б.2 – Ортотропні механічні властивості полімерного композита (ПВТ +
бавовняне волокно) залежно від об'ємного вмісту армувального матеріалу

№	Склад композиту, F	$[\sigma_{TS}]_1$, МПа	$[\sigma_{TS}]_2$, МПа	$[\sigma_{TS}]_3$, МПа	E_1/G_{12} , ГПа	E_2/G_{23} , ГПа	E_3/G_{13} , ГПа	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}
1	Polyethylene HP+Cotton 10 %, $F=2,092$ кН	53,65	11,636	11,636	1,116/ 0,388	0,259/ 0,0904	0,259/ 0,0901	0,438	0,434	0,438
2	Polyethylene HP+Cotton 20 %, $F=3,77$ кН	96,8	13,048	13,048	1,997/ 0,7003	0,291/ 0,1024	0,291/ 0,1019	0,426	0,419	0,426
3	Polyethylene HP+Cotton 30 %, $F=5,458$ кН	139,95	14,849	14,849	2,879/ 1,018	0,331/ 0,1176	0,331/ 0,1169	0,414	0,406	0,414
4	Polyethylene HP+Cotton 40 %, $F=7,141$ кН	183,1	17,227	17,227	3,76/ 1,341	0,383/ 0,1376	0,383/ 0,1367	0,402	0,393	0,402

Таблиця Б.3 – Ортотропні механічні властивості полімерного композита (ПВТ + бананове волокно) залежно від об'ємного вмісту армувального матеріалу

№	Склад композиту, F	$[\sigma_{TS}]_1$, МПа	$[\sigma_{TS}]_2$, МПа	$[\sigma_{TS}]_3$, МПа	E_1/G_{12} , ГПа	E_2/G_{23} , ГПа	E_3/G_{13} , ГПа	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}
1	Polyethylene HP+Banana 10 %, $F=3,182$ кН	81,6	11,648	11,648	2,196/ 0,765	0,26/ 0,0909	0,26/ 0,0905	0,435	0,429	0,435
2	Polyethylene HP+Banana 20 %, $F=5,95$ кН	152,7	13,077	13,077	4,157/ 1,4638	0,292/ 0,1035	0,292/ 0,1027	0,42	0,409	0,42
3	Polyethylene HP+Banana 30 %, $F=8,728$ кН	223,8	14,907	14,907	6,119/ 2,1775	0,333/ 0,1195	0,333/ 0,1184	0,405	0,391	0,405
4	Polyethylene HP+Banana 40 %, $F=11,51$ кН	294,9	17,332	17,332	8,08/ 2,9066	0,387/ 0,1407	0,387/ 0,1392	0,39	0,375	0,39

Таблиця Б.4 – Ортотропні механічні властивості полімерного композита (ПВТ + льняне волокно) залежно від об'ємного вмісту армувального матеріалу

№	Склад композиту, F	$[\sigma_{TS}]_1$, МПа	$[\sigma_{TS}]_2$, МПа	$[\sigma_{TS}]_3$, МПа	E_1/G_{12} , ГПа	E_2/G_{23} , ГПа	E_3/G_{13} , ГПа	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}
1	Polyethylene HP + Flax 10 %, $F=3,056$ кН	78,35	11,647	11,647	5,561/ 1,95	0,26/ 0,093	0,26/ 0,091	0,426	0,404	0,426
2	Polyethylene HP + Flax 20 %, $F=5,702$ кН	146,2	13,075	13,075	10,887/ 3,883	0,292/ 0,107	0,292/ 0,104	0,402	0,366	0,402
3	Polyethylene HP + Flax 30 %, $F=8,348$ кН	214,05	14,903	14,903	16,214/ 5,883	0,334/ 0,125	0,334/ 0,121	0,378	0,335	0,378
4	Polyethylene HP + Flax 40 %, $F=10,99$ кН	281,9	17,324	17,324	21,54/ 7,954	0,389/ 0,149	0,389/ 0,144	0,354	0,309	0,354

Таблиця Б.5 – Ортотропні механічні властивості полімерного композита (ПВТ + конопляне волокно) залежно від об'ємного вмісту армувального матеріалу

№	Склад композиту, F	$[\sigma_{TS}]_1$, МПа	$[\sigma_{TS}]_2$, МПа	$[\sigma_{TS}]_3$, МПа	E_1/G_{12} , ГПа	E_2/G_{23} , ГПа	E_3/G_{13} , ГПа	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}
1	Polyethylene HP + Hemp 10 %, $F=3,664$ кН	93,95	11,651	11,651	4,861/ 1,703	0,26/ 0,092	0,26/ 0,091	0,427	0,408	0,427
2	Polyethylene HP + Hemp 20 %, $F=6,919$ кН	177,4	13,084	13,084	9,487/ 3,378	0,292/ 0,106	0,292/ 0,104	0,404	0,373	0,404
3	Polyethylene HP + Hemp 30 %, $F=10,17$ кН	260,85	14,921	14,921	14,114/ 5,109	0,334/ 0,124	0,334/ 0,121	0,381	0,343	0,381
4	Polyethylene HP + Hemp 40 %, $F=13,43$ кН	344,3	17,356	17,356	18,74/ 6,898	0,389/ 0,147	0,389/ 0,143	0,358	0,318	0,358

Таблиця Б.6 – Ортотропні механічні властивості полімерного композита (ПНТ + кокосове волокно) залежно від об'ємного вмісту армувального матеріалу

№	Склад композиту, F	$[\sigma_{TS}]_1$, МПа	$[\sigma_{TS}]_2$, МПа	$[\sigma_{TS}]_3$, МПа	E_1/G_{12} , ГПа	E_2/G_{23} , ГПа	E_3/G_{13} , ГПа	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}
1	Polyethylene LP + Coir 10 %, $F=1,242$ кН	31,85	15,974	15,974	1,445/ 0,6082	1,195/ 0,5053	1,195/ 0,5032	0,188	0,183	0,188
2	Polyethylene LP + Coir 20 %, $F=1,919$ кН	49,2	17,782	17,782	1,784/ 0,7433	1,301/ 0,5464	1,301/ 0,5422	0,2	0,191	0,2
3	Polyethylene LP + Coir 30 %, $F=2,595$ кН	66,55	20,051	20,051	2,123/ 0,8757	1,428/ 0,5951	1,428/ 0,589	0,212	0,2	0,212
4	Polyethylene LP + Coir 40 %, $F=3,272$ кН	83,9	22,985	22,985	2,463/ 1,0053	1,583/ 0,654	1,583/ 0,646	0,225	0,21	0,225

Таблиця Б.7 – Ортотропні механічні властивості полімерного композита (ПНТ + бавовняне волокно) залежно від об'ємного вмісту армувального матеріалу

№	Склад композиту, F	$[\sigma_{TS}]_1$, МПа	$[\sigma_{TS}]_2$, МПа	$[\sigma_{TS}]_3$, МПа	E_1/G_{12} , ГПа	E_2/G_{23} , ГПа	E_3/G_{13} , ГПа	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}
1	Polyethylene LP+Cotton 10 %, $F=2,233$ кН	57,25	16,053	16,053	1,9/ 0,7978	1,211/ 0,5117	1,211/ 0,5088	0,191	0,184	0,191
2	Polyethylene LP+Cotton 20 %, $F= 3,9$ кН	100	17,978	17,978	2,694/ 1,1169	1,34/ 0,5617	1,34/ 0,5557	0,206	0,193	0,206
3	Polyethylene LP+Cotton 30 %, $F=5,567$ кН	142,75	20,427	20,427	3,489/ 1,428	1,5/ 0,6231	1,5/ 0,614	0,221	0,204	0,221
4	Polyethylene LP+Cotton 40 %, $F=7,234$ кН	185,5	23,649	23,649	4,283/ 1,7312	1,703/ 0,7006	1,703/ 0,6884	0,237	0,215	0,237

Таблиця Б.8 – Ортотропні механічні властивості полімерного композита (ПНТ + бананове волокно) залежно від об'ємного вмісту армувального матеріалу

№	Склад композиту, F	$[\sigma_{TS}]_1$, МПа	$[\sigma_{TS}]_2$, МПа	$[\sigma_{TS}]_3$, МПа	E_1/G_{12} , ГПа	E_2/G_{23} , ГПа	E_3/G_{13} , ГПа	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}
1	Polyethylene LP+Banana 10 %, $F=3,323$ кН	85,2	16,075	16,075	2,98/ 1,2545	1,22/ 0,5159	1,22/ 0,5138	0,188	0,183	0,188
2	Polyethylene LP+Banana 20 %, $F=6,08$ кН	155,9	18,034	18,034	4,854/ 2,0225	1,362/ 0,572	1,362/ 0,5676	0,2	0,191	0,2
3	Polyethylene LP+Banana 30 %, $F=8,837$ кН	226,6	20,537	20,537	6,729/ 2,7746	1,542/ 0,6424	1,542/ 0,6358	0,212	0,2	0,212
4	Polyethylene LP+Banana 40 %, $F=11,59$ кН	297,3	23,847	23,847	8,603/ 3,5114	1,776/ 0,7338	1,776/ 0,7248	0,225	0,21	0,225

Таблиця Б.9 – Ортотропні механічні властивості полімерного композита (ПНТ + льняне волокно) залежно від об'ємного вмісту армувального матеріалу

№	Склад композиту, F	$[\sigma_{TS}]_1$, МПа	$[\sigma_{TS}]_2$, МПа	$[\sigma_{TS}]_3$, МПа	E_1/G_{12} , ГПа	E_2/G_{23} , ГПа	E_3/G_{13} , ГПа	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}
1	Polyethylene LP+Flax 10 %, $F=3,196$ кН	81,95	16,074	16,074	6,345/ 2,6918	1,225/ 0,5199	1,225/ 0,5197	0,179	0,178	0,179
2	Polyethylene LP+Flax 20 %, $F=5,827$ кН	149,4	18,03	18,03	11,58/ 4,9002	1,374/ 0,5818	1,374/ 0,5813	0,182	0,181	0,182
3	Polyethylene LP+Flax 30 %, $F=8,457$ кН	216,85	20,529	20,529	16,82/ 7,0955	1,565/ 0,6607	1,565/ 0,6599	0,186	0,184	0,186
4	Polyethylene LP+Flax 40 %, $F=11,09$ кН	284,3	23,832	23,832	22,06/ 9,278	1,817/ 0,7649	1,817/ 0,7639	0,189	0,187	0,189

Таблиця Б.10 – Ортотропні механічні властивості полімерного композита (ПНТ + конопляне волокно) залежно від об'ємного вмісту армувального матеріалу

№	Склад композиту, F	$[\sigma_{TS}]_1$, МПа	$[\sigma_{TS}]_2$, МПа	$[\sigma_{TS}]_3$, МПа	E_1/G_{12} , ГПа	E_2/G_{23} , ГПа	E_3/G_{13} , ГПа	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}
1	Polyethylene LP+Hemp 10 %, $F=3,804$ кН	97,55	16,08	16,08	5,645/ 2,3925	1,225/ 0,5194	1,225/ 0,5191	0,18	0,179	0,18
2	Polyethylene LP+Hemp 20 %, $F=7,043$ кН	180,6	18,048	18,048	10,18 / 4,2999	1,373/ 0,5805	1,373/ 0,5798	0,184	0,183	0,184
3	Polyethylene LP+Hemp 30 %, $F=10,28$ кН	263,65	20,563	20,563	14,72/ 6,1926	1,563/ 0,6584	1,563/ 0,6572	0,189	0,187	0,189
4	Polyethylene LP+Hemp 40 %, $F=13,52$ кН	346,7	23,893	23,893	19,26/ 8,0706	1,813/ 0,7612	1,813/ 0,7596	0,193	0,191	0,193

Таблиця Б.11 – Ортотропні механічні властивості полімерного композита (ПП + кокосове волокно) залежно від об'ємного вмісту армувального матеріалу

№	Склад композиту, F	$[\sigma_{TS}]_1$, МПа	$[\sigma_{TS}]_2$, МПа	$[\sigma_{TS}]_3$, МПа	E_1/G_{12} , ГПа	E_2/G_{23} , ГПа	E_3/G_{13} , ГПа	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}
1	Polypropene + Coir 10 %, $F=1,874$ кН	48,05	35,431	35,431	1,98/ 0,7031	1,813/ 0,6457	1,813/ 0,6437	0,408	0,404	0,408
2	Polypropene + Coir 20 %, $F=2,48$ кН	63,6	38,942	38,942	2,26/ 0,8095	1,942/ 0,699	1,942/ 0,6954	0,396	0,389	0,396
3	Polypropene + Coir 30 %, $F=3,087$ кН	79,15	43,226	43,226	2,54/ 0,9176	2,09/ 0,7601	2,09/ 0,7551	0,384	0,375	0,384
4	Polypropene + Coir 40 %, $F=3,693$ кН	94,7	48,569	48,569	2,82/ 1,0277	2,263/ 0,8308	2,263/ 0,8248	0,372	0,362	0,372

Таблиця Б.12 – Ортотропні механічні властивості полімерного композита (ПП + бавовняне волокно) залежно від об'ємного вмісту армувального матеріалу

№	Склад композиту, F	$[\sigma_{TS}]_1$, МПа	$[\sigma_{TS}]_2$, МПа	$[\sigma_{TS}]_3$, МПа	E_1/G_{12} , ГПа	E_2/G_{23} , ГПа	E_3/G_{13} , ГПа	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}
1	Polypropene + Cotton 10 %, $F=2,865$ кН	73,45	35,818	35,818	2,435/ 0,8629	1,85/ 0,6567	1,85/ 0,6557	0,411	0,409	0,411
2	Polypropene + Cotton 20 %, $F=4,462$ кН	114,4	39,892	39,892	3,17/ 1,1305	2,03/ 0,7258	2,03/ 0,7239	0,402	0,398	0,402
3	Polypropene + Cotton 30 %, $F=6,058$ кН	155,35	45,01	45,01	3,905/ 1,4017	2,248/ 0,8095	2,248/ 0,8068	0,393	0,388	0,393
4	Polypropene + Cotton 40 %, $F=7,655$ кН	196,3	51,636	51,636	4,64/ 1,6763	2,518/ 0,9132	2,518/ 0,9097	0,384	0,379	0,384

Таблиця Б.13 – Ортотропні механічні властивості полімерного композита (ППІ + бананове волокно) залежно від об'ємного вмісту армувального матеріалу

№	Склад композиту, F	$[\sigma_{TS}]_1$, МПа	$[\sigma_{TS}]_2$, МПа	$[\sigma_{TS}]_3$, МПа	E_1/G_{12} , ГПа	E_2/G_{23} , ГПа	E_3/G_{13} , ГПа	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}
1	Polypropene +Banana 10 %, $F=3,955$ кН	101,4	35,931	35,931	3,515/ 1,2482	1,871/ 0,6664	1,871/ 0,6644	0,408	0,404	0,408
2	Polypropene +Banana 20 %, $F=6,642$ кН	170,3	40,173	40,173	5,33/ 1,909	2,08/ 0,749	2,08/ 0,7451	0,396	0,389	0,396
3	Polypropene +Banana 30 %, $F=9,329$ кН	239,2	45,549	45,549	7,145/ 2,5813	2,343/ 0,8519	2,343/ 0,8463	0,384	0,375	0,384
4	Polypropene +Banana 40 %, $F=12,02$ кН	308,1	52,587	52,587	8,96/ 3,2653	2,68/ 0,9839	2,68/ 0,9768	0,372	0,362	0,372

Таблиця Б.14 – Ортотропні механічні властивості полімерного композита (ППІ + льняне волокно) залежно від об'ємного вмісту армувального матеріалу

№	Склад композиту, F	$[\sigma_{TS}]_1$, МПа	$[\sigma_{TS}]_2$, МПа	$[\sigma_{TS}]_3$, МПа	E_1/G_{12} , ГПа	E_2/G_{23} , ГПа	E_3/G_{13} , ГПа	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}
1	Polypropene +Flax 10 %, $F=3,827$ кН	98,15	35,923	35,923	6,88/ 2,4589	1,882/ 0,6811	1,882/ 0,6727	0,399	0,382	0,399
2	Polypropene +Flax 20 %, $F=6,388$ кН	163,8	40,152	40,152	12,06/ 4,3759	2,108/ 0,7808	2,108/ 0,765	0,378	0,35	0,378
3	Polypropene +Flax 30 %, $F=8,948$ кН	229,45	45,509	45,509	17,24/ 6,3522	2,396/ 0,9054	2,396/ 0,8828	0,357	0,323	0,357
4	Polypropene +Flax 40 %, $F=11,51$ кН	295,1	52,515	52,515	22,42/ 8,3907	2,775/ 1,0671	2,775/ 1,0384	0,336	0,3	0,336

Таблиця Б.15 – Ортотропні механічні властивості полімерного композита (ПП + конопляне волокно) залежно від об'ємного вмісту армувального матеріалу

№	Склад композиту, F	$[\sigma_{TS}]_1$, МПа	$[\sigma_{TS}]_2$, МПа	$[\sigma_{TS}]_3$, МПа	E_1/G_{12} , ГПа	E_2/G_{23} , ГПа	E_3/G_{13} , ГПа	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}
1	Polypropene +Hemp 10 %, $F=4,436$ кН	113,75	35,957	35,957	6,18/ 2,207	1,881/ 0,679	1,881/ 0,6718	0,4	0,385	0,4
2	Polypropene +Hemp 20 %, $F=7,605$ кН	195	40,238	40,238	10,66/ 3,8618	2,106/ 0,7765	2,106/ 0,7628	0,38	0,356	0,38
3	Polypropene +Hemp 30 %, $F=10,77$ кН	276,25	45,676	45,676	15,14/ 5,5649	2,391/ 0,8985	2,391/ 0,8789	0,36	0,331	0,36
4	Polypropene +Hemp 40 %, $F=13,94$ кН	357,5	52,813	52,813	19,62/ 7,3187	2,766/ 1,0567	2,766/ 1,0318	0,34	0,309	0,34

Таблиця Б.16 – Ортотропні механічні властивості полімерного композита (ПС + кокосове волокно) залежно від об'ємного вмісту армувального матеріалу

№	Склад композиту, F	$[\sigma_{TS}]_1$, МПа	$[\sigma_{TS}]_2$, МПа	$[\sigma_{TS}]_3$, МПа	E_1/G_{12} , ГПа	E_2/G_{23} , ГПа	E_3/G_{13} , ГПа	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}
1	Polystyrene + Coir 10 %, $F=2,313$ кН	59,3	48,705	48,705	3,33/ 1,2379	3,295/ 1,2257	3,295/ 1,225	0,345	0,344	0,345
2	Polystyrene + Coir 20 %, $F=2,87$ кН	73,6	53,074	53,074	3,46/ 1,291	3,396/ 1,2685	3,396/ 1,2672	0,34	0,339	0,34
3	Polystyrene + Coir 30 %, $F=3,43$ кН	87,9	58,305	58,305	3,59/ 1,3446	3,504/ 1,3139	3,504/ 1,3122	0,335	0,333	0,335
4	Polystyrene + Coir 40 %, $F=3,985$ кН	102,2	64,679	64,679	3,72/ 1,3985	3,618/ 1,3621	3,618/ 1,3602	0,33	0,328	0,33

Таблиця Б.17 – Ортотропні механічні властивості полімерного композита (ПС + бавовняне волокно) залежно від об'ємного вмісту армувального матеріалу

№	Склад композиту, F	$[\sigma_{TS}]_1$, МПа	$[\sigma_{TS}]_2$, МПа	$[\sigma_{TS}]_3$, МПа	E_1/G_{12} , ГПа	E_2/G_{23} , ГПа	E_3/G_{13} , ГПа	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}
1	Polystyrene +Cotton 10 %, $F=3,30$ кН	84,7	49,441	49,441	3,785/ 1,4039	3,421/ 1,2691	3,421/ 1,269	0,348	0,348	0,348
2	Polystyrene +Cotton 20 %, $F=4,852$ кН	124,4	54,854	54,854	4,37/ 1,6233	3,675/ 1,3654	3,675/ 1,3652	0,346	0,346	0,346
3	Polystyrene +Cotton 30 %, $F=6,4$ кН	164,1	61,598	61,598	4,955/ 1,8434	3,97/ 1,4772	3,97/ 1,4769	0,344	0,344	0,344
4	Polystyrene +Cotton 40 %, $F=7,948$ кН	203,8	70,233	70,233	5,54/ 2,0641	4,316/ 1,6084	4,316/ 1,608	0,342	0,342	0,342

Таблиця Б.18 – Ортотропні механічні властивості полімерного композита (ПС + бананове волокно) залежно від об'ємного вмісту армувального матеріалу

№	Склад композиту, F	$[\sigma_{TS}]_1$, МПа	$[\sigma_{TS}]_2$, МПа	$[\sigma_{TS}]_3$, МПа	E_1/G_{12} , ГПа	E_2/G_{23} , ГПа	E_3/G_{13} , ГПа	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}
1	Polystyrene +Banana 10 %, $F=4,393$ кН	112,65	49,656	49,656	4,865/ 1,8086	3,493/ 1,2992	3,493/ 1,2985	0,345	0,344	0,345
2	Polystyrene +Banana 20 %, $F=7,032$ кН	180,3	55,386	55,386	6,53/ 2,4366	3,845/ 1,4361	3,845/ 1,4347	0,34	0,339	0,34
3	Polystyrene +Banana 30 %, $F=9,67$ кН	247,95	62,612	62,612	8,195/ 3,0693	4,276/ 1,6035	4,276/ 1,6015	0,335	0,333	0,335
4	Polystyrene +Banana 40 %, $F=12,31$ кН	315,6	72,006	72,006	9,86/ 3,7068	4,816/ 1,813	4,816/ 1,8104	0,33	0,328	0,33

Таблиця Б.19 – Ортотропні механічні властивості полімерного композита (ПС + льняне волокно) залежно від об'ємного вмісту армувального матеріалу

№	Склад композиту, F	$[\sigma_{TS}]_1$, МПа	$[\sigma_{TS}]_2$, МПа	$[\sigma_{TS}]_3$, МПа	E_1/G_{12} , ГПа	E_2/G_{23} , ГПа	E_3/G_{13} , ГПа	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}
1	Polystyrene +Flax 10 %, $F=4,267$ кН	109,4	49,64	49,64	8,23/ 3,0801	3,532/ 1,3297	3,532/ 1,3219	0,336	0,328	0,336
2	Polystyrene +Flax 20 %, $F=6,778$ кН	173,8	55,346	55,346	13,26/ 5,0151	3,941/ 1,5056	3,941/ 1,4906	0,322	0,309	0,322
3	Polystyrene +Flax 30 %, $F=9,289$ кН	238,2	62,535	62,535	18,29/ 6,9916	4,457/ 1,7254	4,457/ 1,7038	0,308	0,292	0,308
4	Polystyrene +Flax 40 %, $F=11,80$ кН	302,6	71,871	71,871	23,32/ 9,0108	5,129/ 2,0092	5,129/ 1,9818	0,294	0,276	0,294

Таблиця Б.20 – Ортотропні механічні властивості полімерного композита (ПС + конопляне волокно) залежно від об'ємного вмісту армувального матеріалу

N	Склад композиту, F	$[\sigma_{TS}]_1$, МПа	$[\sigma_{TS}]_2$, МПа	$[\sigma_{TS}]_3$, МПа	E_1/G_{12} , ГПа	E_2/G_{23} , ГПа	E_3/G_{13} , ГПа	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}
1	Polystyrene +Hemp 10 %, $F=4,875$ кН	125	49,706	49,706	7,53/ 2,8158	3,529/ 1,3258	3,529/ 1,3195	0,337	0,331	0,337
2	Polystyrene +Hemp 20 %, $F=7,995$ кН	205	55,511	55,511	11,86/ 4,4782	3,932/ 1,497	3,932/ 1,4848	0,324	0,313	0,324
3	Polystyrene +Hemp 30 %, $F=11,12$ кН	285	62,851	62,851	16,19/ 6,1733	4,44/ 1,7107	4,44/ 1,6932	0,311	0,298	0,311
4	Polystyrene +Hemp 40 %, $F=14,23$ кН	365	72,429	72,429	20,52/ 7,902	5,099/ 1,9861	5,099/ 1,9637	0,298	0,284	0,298

Додаток В Копії статей, доповідей та тез доповідей

Стаття у фаховому журналі України: Мікульонок І.О., Карвацький А.Я., Караулова В.О. Тверді гетерогенні системи (до питання термінології) // Упаковка. – 2018. – № 3. – С.

Інформація – наша професія

енциклопедія | упаковка 3'2018

УДК 544.015.22.001.4-025.25

Тверді гетерогенні системи (до питання термінології)

І.О. Мікульонок, д.т.н., А.Я. Карвацький, д.т.н., В.О. Караулова, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ

Одним з елементів професійної підготовки будь-якого фахівця є опанування ним мови його та суміжних спеціальностей, основою якої є відповідна термінологія. Щоб полегшити процес її засвоєння, основу фахової мови має складати впорядкована та стандартизована термінологія, без знання якої повноцінна професійна діяльність просто неможлива.

Внаслідок різного досвіду та неоднакового особистого сприйняття один і той самий термін або визначення можуть викликати в різних людей різні уявлення. У деяких випадках фахівці користуються тими чи іншими термінами через звичку, що часто є причиною різного трактування певних понять. При цьому фахівці іноді вживають не тільки суперечливі, а й не дозволені до вживання терміни, що значно ускладнює відповідний текст та спричиняє певні труднощі в читача [1]. Подібні труднощі існують майже в будь-якій сфері діяльності, у тому числі в матеріалознавстві – галузі науки, що розвивається найбільш динамічно. Саме воно сьогодні потужно впливає на розвиток пакувальних матеріалів, особливо з різних полімерних композицій, які широко використовуються для виробництва полімерних плівок, у тому числі багатшарових.



Упродовж тривалого часу для виготовлення речей, потрібних для її існування, людина використовувала здебільшого природні матеріали. Проте починаючи з минулого століття завдяки зусиллям науковців та інженерів було одержано численні нові матеріали з найрізноманітнішими властивостями. За рахунок зміни складу ці матеріали набули найширшого застосування майже в усіх сферах людської діяльності [2]. Не в останню чергу це різноманіття притаманне пакувальним матеріалам, адже часто певне пакування розробляють під конкретну продукцію. Одним із видів створених людиною матеріалів є такі, що є поєднанням декількох компонентів, завдяки чому вони набувають нових властивостей. Такі матеріали часто називають композиційними чи композитними матеріалами, або навіть просто композитами. При цьому ДСТУ 2241–93 зазначені терміни визначає як синоніми [3]. У той же час інші джерела тлумачать ці терміни інакше. Аналізу наявних визначень і тлумачень термінів, похідних від слова «композит», уже було присвячено відповідні дослідження [2]. Проте час, що минув, потребує уточнення певних моментів. Перш за все треба розрізняти такі поняття, як «матеріал», «напівфабрикат» і «виріб».

Відповідно до [4], матеріал – це категорія об'єкта, що охоплює будь-яку речовину, проміжний продукт чи композицію речовин, яку піддають дії, щоб виробити продукт (у свою чергу продукт – це виріб чи композиція речовини, яка отримана в результаті процесу та яка характеризується своїми структурними особливостями або фізичними чи хімічними властивостями).

Згідно з ДСТУ 2391:2010, матеріал – це первинний предмет праці, що використовують для виготовлення виробу [5], а згідно з працею [6] – це продукція, призначена для використання тільки як предмета праці в про-

цесах виробництва деталей, складальних одиниць (вузлів), виробів, а також інших матеріалів.

Отже, як бачимо, матеріал призначений для виготовлення з нього певного продукту, передусім виробу або напівфабрикату. При цьому під виробом розуміють предмет або набір предметів виробництва, що підлягають виготовленню в організації (на підприємстві) за конструкторською документацією [7], а під напівфабрикатом – предмет особливої форми (який може мати невизначену довжину) з твердого матеріалу, що є результатом певної попередньої операції, призначений для виготовлення виробу або виробів [4].





Тепер повернемося до поняття «композит».

Як було зазначено, відповідно до ДСТУ 2241–93, композитний матеріал, композиційний матеріал або композит — це гетерофазовий матеріал, окремі фази якого виконують специфічні функції, забезпечуючи йому властивості, яких не має жоден із компонентів окремо [3]. Отже, зазначений стандарт ототожнює терміни «композиційний матеріал», «композитний матеріал» і «композит».

З огляду на те, що під композицією в матеріалознавстві зазвичай розуміють суміш (зокрема, в праці [8] терміни «суміш» і «композиція» розглядаються як синоніми), спробуємо запропонувати нові тлумачення чотирьох термінів, які можуть бути об'єднані одним терміном «композит».

Композиційний матеріал — це гетерогенний ізотропний матеріал у вигляді одержаного без застосування складальних операцій твердого тіла, який містить щонайменше дві фази з вираженою межею поділу між ними й властивостями, відмінними від властивостей кожної окремої фази, при цьому щонайменше одна з фаз є безперервною в об'ємі зазначеного твердого тіла.

Отже, виготовлення виробу з композиційного матеріалу передбачає формоутворення виробу шляхом пластичного деформування цього матеріалу або видалення його частин, наприклад, зніманням стружки.

У разі наявності в композиційному матеріалі дисперсної фази вона переважно представляє собою сукупність дисперсних частинок, а також хаотично орієнтованих волокнистих і волокнуподібних матеріалів.

Разом з ізотропними гетерогенними матеріалами широкого поширення набули й гетерогенні матеріали, які мають таку структуру, що робить їх анізотропними (зазвичай ортотропними, тобто такими, фізичні або фізико-хімічні властивості яких неоднакові по двох або трьох взаємно перпендикулярних напрямках всередині них). Прикладами таких матеріалів можуть бути різноманітні текстоліти, що містять листовий наповнювач різної природи (азбо-, базальто-, карбо-, органі-, склотекстоліти) [9].

Таку структуру неможливо одержати традиційним змішуванням компонентів суміші, тому її одержують іншими методами. З огляду на зазначене подібні матеріали пропонують називати композитними, а не композиційними.

Композитний матеріал — це продукт у вигляді анізотропного твердого тіла певних форми й розмірів, що складається щонайменше з двох фаз із вираженою межею поділу між ними й властивостями, відмінними від властивостей кожної окремої фази, при цьому в разі наявності дисперсної фази вона представляє собою сукупність орієнтованих у певному напрямку (певних напрямках) волокнистих, волокнуподібних та/або двовимірних матеріалів.

Відповідно до пропонованого визначення, до композитних матеріалів належать як матеріали з безперервною в об'ємі фазою (матрицею), так і двотабагатошарові, а також комбіновані листові, рулонні й плівкові матеріали (у тому числі з проміжним гофрованим шаром).

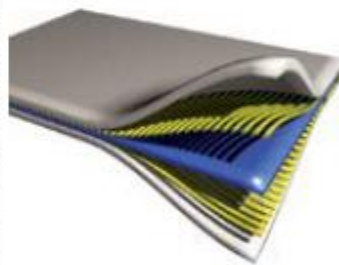
Як відомо [9], дво- або багатошаровий матеріал — це листовий, рулон-

ний або плівковий матеріал, що складається із шарів зазвичай однакових за природою матеріалів (наприклад, полімерів або матеріалів на їх основі), а комбінований матеріал — це листовий, рулонний або плівковий матеріал, що складається із шарів різних за природою матеріалів (наприклад, полімерів, паперу, металевої фольги, тканин тощо).

При цьому шаруваті композитні матеріали бувають двох видів:

1. Матеріали, що складаються зазвичай щонайменше з одного наповнювача у вигляді пористого двовимірного матеріалу (тканини, сітки та ін.), закладеного в матрицю за умови, що закладений у матрицю наповнювач простягається по всій площі шаруватого композиційного матеріалу. При цьому матриця не тільки покриває двовимірний наповнювач з обох його боків, але й завдяки нещільностям структури наповнювача пронизує його по всій поверхні. До таких матеріалів належить, наприклад, армований металевою сіткою скляний лист;

2. Матеріали, що складаються із сукупності суцільних шарів, які не за-



кладені в спільну для них матрицю (навіть за умови виконання зовнішніх шарів тришарового матеріалу з того самого матеріалу). До таких матеріалів належить, наприклад, триплекс — багатошарове скло, що складається щонайменше із двох органічних або силікатних стекол, склеєних між собою полімерною плівкою або фотоствердною композицією, здатною в результаті удару втримувати осколки. За аналогією з композиційними й композитними матеріалами пропонується розрізняти композиційні й композитні конструкції.

Композиційна конструкція — це виріб у вигляді ізотропного твердого тіла певних форми й розмірів, який призначений для безпосереднього застосування та складається з безперервної фази (матриці) і розміщеного в ній щонайменше одного армувального елемента, одержаного із застосуванням складальних операцій з утворенням нерознімних з'єднань. Армувальний елемент композиційної конструкції може бути виготовлений зі стрижнів чи трубок постійного та/або змінного по довжині профілю (сталь гарячекатана для армування залізобетонних конструкцій), а також у вигляді тривимірних елементів (у тому числі й каркасних структур). Зрозуміло, що разом із зазначеним армувальним елементом до складу композиційної конструкції можуть входити інші наповнювачі, застосовувані в композиційних матеріалах. Прикладами композиційних конструкцій можуть бути рівномірні залізобетонні вироби або конструкції.

Композитна конструкція — це виріб у вигляді одержаного із застосування складальних операцій з утворенням нерознімних з'єднань анізотропного твердого тіла певних форми й розмірів, який призначений для безпосереднього застосування та складається щонайменше з двох фаз із вираженою межею поділу між ними й властивостями, відмінними від властивостей кожної окремої фази. Прикладами композитних конструкцій можуть бути нерівномірні залізобетонні вироби або конструкції, а також металопластиковий віконний профіль.

www.upakjour.com.ua



Висновки

Зроблено спробу уточнення термінів, що стосуються твердих гетерогенних систем, які прийнято називати композиційними або композитними матеріалами, а також композитами. Запропоновані визначення можуть бути предметом подальшої дискусії, у зв'язку із чим автори з вдячністю приймуть будь-які зауваження та пропозиції щодо їх удосконалення.

Література

1. Мікульонюк І.О. Термінологія й правопис термінів у патентній документації // Інтелектуальна власність. 2000. № 5. С. 19–25.
2. Мікульонюк І.О. Тверді дво- і багатокомпонентні матеріали (до питання термінології) // Упаковка. 2015. № 3. С. 6–10.
3. ДСТУ 2241–93. Матеріали композитні. Склопластики. Терміни та визначення. Київ: Держстандарт України, 1993. 47 с.
4. Міжнародна патентна класифікація (Версія 2017 р.). Довідник. URL: <http://base.uipv.org/mpk2009/index.html?level=c&version=2> (дата звернення 08.03.2018).
5. ДСТУ 2391:2010. Система технологічної документації. Терміни та визначення основних понять. Київ: Держспоживстандарт України, 2011. 35 с.
6. Терминология государственной системы стандартизации: справочник. Москва: Изд-во стандартов, 1989. 144 с.

7. ГОСТ 2.101–2016. Единая система конструкторской документации. Виды изделий. Москва: Стандартинформ, 2016. 8 с.

8. Химия. Энциклопедия / под ред. И. Л. Кнунянца. Москва: Большая Российская энцикл., 2003. 972 с.

9. Мікульонюк І.О., Сокольський О.Л. Полімерні матеріали і вироби з них (одержання, перероблення, властивості): термінологічний словник. Київ: НТУУ «КПІ», 2015. 208 с.

Твердые гетерогенные системы (к вопросу терминологии)

И.О. Миклулюк, д.т.н.,
А.Я. Карватский, д.т.н.,
В.А. Караулова

Предложено различать прилагательные «композиционный» и «композитный». Также даны уточненные определения терминов «композиционный материал», «композитный материал», «композиционная конструкция» и «композитная конструкция».

Ключевые слова: гетерогенная система; композиционный материал; композитный материал; терминология.

Firm heterogeneous systems (to a terminology problem)

I.O. Mikulionok, Dr.,
A.Ya. Karvatskiy, Dr.,
V.O. Karaulova

It is offered to distinguish adjectives «composition» and «compositex». The specified definitions of the terms «composition materials», «composite materials», «composition structures» and «composite structures» are also given.

Key words: heterogeneous system; composition material; composite material; terminology.

Стаття у фаховому журналі України: Карвацький А.Я., Мікульонок І.О., Караулова В.О. Механічні властивості армованих полімерних матеріалів для виготовлення тари та упаковки // Упаковка. – 2018. – № 4. – С. (подана)

УДК 621.798.14:539.4-025.25

Механічні властивості армованих полімерних матеріалів для виготовлення тари та упаковки

Карвацький А.Я., д.т.н., Мікульонок І.О., д.т.н., Караулова В.О., студентка
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ

Полімери є одними із найпоширеніших матеріалів, що використовуються в пакувальній індустрії. Завдяки своїм унікальним властивостям в багатьох випадках вони стають якщо не незамінними, то найбільш доцільними для зберігання численних видів продукції різноманітного призначення. Основними перевагами полімерних пакувальних матеріалів є технічні, технологічні, економічні та естетичні [1–3]. Проте застосування полімерів для виготовлення тари та упаковки має і певні недоліки, передусім відносно невеликі, порівняно з металами, міцнісні характеристики та тривалий час розкладання в природних умовах під дією чинників навколишнього середовища [4–6].

Одним з можливих шляхів вирішення цієї подвійної проблеми може бути використання полімерних матеріалів, армованих природними волокнами, тому розробка складу нових матеріалів для виготовлення тари та упаковки з прогнозованими механічними властивостями є достатньо актуальним завданням.

Полімерний армований волокном композиційний матеріал складається з полімерної матриці та розподілених у ній певним чином волокон. До широко використовуваних високоміцних волокон можна віднести кевлар, скло та вуглець. Проте останнім часом завдяки беззаперечним перевагам дослідники все частіше звертають увагу на натуральні волокна, які характеризуються низькими вартістю й густиною, достатньою міцністю, низькою твердістю (відсутністю абразивності), безпекою для довкілля та відновлюваністю [7, 8].

До найбільш розповсюджених у світовій практиці природних волокон належать абака, бамбук, банан, кокос, бавовна, льон, конопля, джут, кенаф, сизаль, пальма тощо [9, 10].

У праці [9] виконано прогнозування впливу різних класів натуральних волокон за різного значення об'ємної частки (10, 20, 30 та 40 %) на властивості армованої вінілової ефірної смоли за допомогою аналітичних співвідношень [11] та моделювання за допомогою програмного продукту ANSYS Mechanical APDL [12]. Використовуючи аналітичний підхід та числове моделювання в цій праці визначено механічні властивості композитів, такі як міцність на розрив, модуль пружності, жорсткість та ударну в'язкість композицій вінілового ефіру, армованих різними натуральними волокнами, і отримані значення порівняно зі значеннями для чистої полімерної матриці.

Зазвичай механічні властивості полімерів досліджуються експериментально згідно з ASTM D638 [13]. Під час цих одновісних випробувань визначаються, окрім технічних (модуля пружності

E і коефіцієнта Пуассона ν), такі важливі механічні властивості як: σ_{ult} – міцність на розрив (Па);

U_T – жорсткість (Дж/м³); G_C – ударна в'язкість (Дж/м²).

Міцність на розрив матеріалу зразка визначається за даними експерименту

$$\sigma_{ult} = \frac{F_{ult}}{A}, \quad (1)$$

де F_{ult} – розривне зусилля, Н; A – площа поперечного перерізу стандартного зразка в робочій зоні, м².

Жорсткість матеріалу зразка визначається за формулою

$$U_T = \sigma_1 \varepsilon_1, \quad (2)$$

де $\sigma_1 = \sigma_{ult}$ – напруження під час одновісного випробування, Па; ε_1 – деформація під час одновісного випробування.

Ударна в'язкість матеріалу зразка визначається за формулою

$$G_c = \frac{U_T V}{A}, \quad (3)$$

де V – об'єм робочої зони зразка, м³.

Для проведення експериментальних досліджень необхідно мати як дослідні зразки полімерних композитів, так і відповідне експериментальне обладнання, що обумовлює певні матеріальні витрати. Певною мірою цього можна уникнути, якщо для визначення механічних властивостей композитів, особливо на етапі їх розробки, скористатися аналітичними співвідношеннями та числовим моделюванням.

У праці [9] для безперервного односпрямованого композитного полімеру механічні властивості спочатку визначалися за аналітичними залежностями. При цьому теоретичні дослідження показали, що включення більш високої частки фракції клітковини в матрицю із вініловим ефіром приводить до поліпшення механічних властивостей композиту порівняно з чистим матеріалом. Включення волокон абаки, коноплі та банана за різних навантажень у поліефірні полімери значно підвищує міцність на стискання відповідних композитів. Якщо використовувати аналітичні залежності, то 40 % частка волокна абаки в смолі сприяє підвищенню міцності під час розтягу до 436 МПа (що на 497 % більше, ніж для чистої матриці). За результатами симуляції ANSYS для цієї ж композиції значення міцності на розрив становить 468 МПа (що на 541 % більше, ніж для чистої матриці).

Додавання 40 % вмісту бананового волокна в матрицю вінілового ефіру показує максимальну жорсткість 1208,19 Дж/м³ та ударну в'язкість 60,41 Дж/м² з використанням аналітичних залежностей та симуляції ANSYS, яка демонструє максимальну жорсткість 1270,39 Дж/м³ та ударну в'язкість 63,52 Дж/м³.

У результаті аналізу науково-технічної літератури, сучасного стану питання розробки та дослідження механічних властивостей полімерних матеріалів, армованих природними волокнами встановлено, що:

- полімерні композиційні матеріали, армовані волокнами різної природи, відносяться до класу ортотропних матеріалів;
- до механічних властивостей полімерних композитів, які зазвичай визначаються експериментальними методами, крім технічних (модуля пружності і коефіцієнта Пуассона) також відносяться міцність на розрив, жорсткість і ударна в'язкість;
- на етапі розробки полімерних композиційних матеріалів для визначення механічних властивостей доцільно скористатися аналітичними співвідношеннями та числовим моделюванням.

Також встановлено, що для армування волокнами підходять такі полімери як поліетилен високого та низького тиску, поліпропілен, полістирол тощо, а як армувальні волокна можна взяти волокна таких рослин як кокос, бавовна, банан, конопля і льон. Механічні властивості вказаних полімерів та волокон рослин наведено в таблицях 1 і 2.

Таблиця 1. Механічні властивості полімерів

Полімер	ρ , кг/м ³	$[\sigma_{TS}]$, МПа	E , ГПа	ν
Поліетилен високого тиску (ПВТ) – Polyethylene HP	910–930	8–13	0,118–0,35	0,4–0,5
Поліетилен низького тиску (ПНТ) – Polyethylene LP	940–970	10–19	0,61–1,6	0,15–0,2

Поліпропілен (ПП) блок-сополімер (PP) – Polypropene	915	25–40	1,7	0,42
Полістирол (ПС) – Polystyrene	1060	40–50	3,2	0,35

Таблиця 2. Механічні властивості волокна природного походження [9]

Волокно	ρ , кг/м ³	$[\sigma_{TS}]$, МПа	E , ГПа	ν
Кокосове волокно – Coir	1250–1500	106–270	3–6	0,3
Бавовняне волокно – Cotton	1500–1600	287–597	5,5–12,6	0,33
Бананове волокно – Banana	1300–1350	529–914	7,7–32	0,3
Конопляне волокно – Hemp	1400–1500	580–1110	3–90	0,221
Льняне волокно – Flax	1400–1500	343–1035	27–80	0,21

З використанням обраних полімерів, волокон та аналітичних співвідношень для ортотропного наближення визначено ефективні механічні властивості відповідних композиційних матеріалів. На підставі механічних властивостей вказаних композитів, що включають компоненти вектора границі міцності і модуля пружності та компоненти тензора коефіцієнтів Пуассона та відповідних аналітичних залежностей було) визначено такі фізичні властивості композитів як жорсткість і ударна в'язкість для напрямку максимального значення границі міцності (OX). Результати цих розрахунків наведено на рис. 1 і 2.

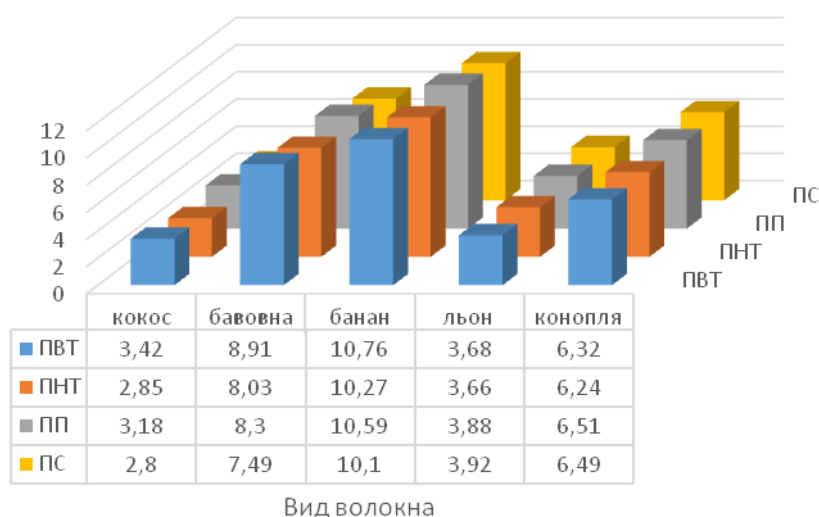


Рис. 1. Залежність ударної жорсткості (U_T , МДж/м³) полімерних композитних матеріалів від типу матриці і волокна з об'ємною часткою 40 %

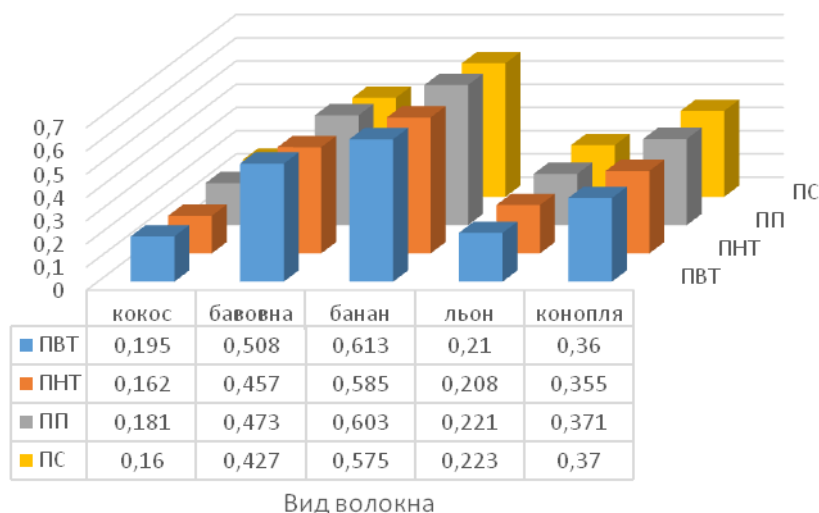


Рис. 2. Залежність ударної в'язкості (G_{IS} , МДж/м²) полімерних композитних матеріалів від типу матриці і волокна з об'ємною часткою 40 %

Ефективні ортотропні механічні властивості композиційних матеріалів також були визначені за допомогою числового аналізу напружено-деформованої системи (НДС) зразків композитів згідно зі стандартом ASTM D638 з використанням розроблених авторами алгоритму та програмного забезпечення [17]. Аналіз отриманих результатів показав задовільну збіжність з даними, отриманими за допомогою аналітичних співвідношень (похибка числових розрахунків не перевищує 3 %).

Проведені дослідження показали, що:

- найвищі значення механічних властивостей спостерігаються в разі використання волокна банану, льону та коноплі, зокрема модуль пружності в напрямку волокон становить понад 8 ГПа, а границя міцності – більше ніж 290 МПа, що перевищує міцність сталі Ст. 3 (230 МПа);
- жорсткість та ударна в'язкість найвища в разі застосування армувального волокна з бавовни і банана та становлять понад 8,9 МДж/м³ і 0,5 МДж/м², відповідно.

Відомо, що найбільш суттєвим припущенням (гіпотезою) під час дослідження механічних властивостей композитів є те, що деформації у напрямку волокна односпрямованого волокно-армованого композитного матеріалу однакові як у волокнах, так і у матриці [7]. Але, на практиці, таке припущення або взагалі не виконується, або виконується частково. Тому доцільно виконати відповідні числові оцінки роботоздатності висунутої гіпотези, тобто визначити, коли можна користуватися аналітичними залежностями для обчислення ефективних механічних властивостей композитів в ортотропному наближенні.

Для виконання цих досліджень авторами було розглянуто два граничних випадки: перший – абсолютний контакт між волокном і матрицею; другий – повна відсутність контактної взаємодії між волокном і матрицею (тобто відсутня адгезія між фазами композиту, що спричинює відносне проковзування матриці й волокна).

Для проведення такого дослідження було створено найпростішу модель композитного полімеру, яка складається з одного волокна циліндричної форми, оточеного полімерною матрицею. При цьому механічні властивості матриці та волокна відповідають не ефективним, а дійсним значенням цих матеріалів в ізотропному наближенні. Реалізація умов абсолютного контакту та його відсутності відбувається в процесі побудови числової моделі.

Подальша побудова числової моделі виконана з використанням програмних продуктів ANSYS Mechanical APDL [12] за допомогою розробки відповідного макросу, написаного на мові програмування APDL. За граничні умови брали такі: з одного торця композиту задавалося закріплення, а з протилежного – тиск з від'ємним знаком (тобто до волокна і матриці прикладено однакове силове навантаження).

Аналіз отриманих даних показав, що:

– у разі наявності достатньої адгезії між фазами полімерного композиту контакт між ними наближається до абсолютного; при цьому похибка застосування аналітичних співвідношень для визначення ефективних механічних властивостей композиту не перевищує 2,1 %, що є цілком достатнім для виконання інженерних розрахунків на міцність;

– у разі відсутності достатньої адгезії між фазами полімерного композиту силова взаємодія між ними наближається до нуля; при цьому похибка застосування аналітичних співвідношень для визначення ефективних механічних властивостей композиту перевищує 90 % для модуля пружності, що свідчить про неможливість застосування адитивних співвідношень для визначення механічних властивостей композитів у разі недостатньої адгезії між його фазами (полімером і волокном).

Для виконання числового аналізу міцності виробів з армованого полімеру виберемо тару у вигляді пляшки, навантаженої внутрішнім надлишковим тиском (при цьому ПЕТ-пляшки випробовують під надлишковим тиском до 20 бар, а скляні – до 70 бар).

На першому етапі побудови числової моделі тари була розроблена твердотільна модель пляшки для зберігання мийних засобів з використанням CAD-системи SolidWorks [14, 15] (рис. 3).



Рис. 3. Твердотільна модель пляшки з полімерного матеріалу

Для побудови числової моделі НДС пляшки використано програмний продукт ANSYS Workbench і тип аналізу – static structural analysis [16]. Побудова числової моделі НДС пляшки включала такі етапи в проєкті static structural:

- 1) Engineering Data – підготовка механічних властивостей матеріалу;
- 2) Geometry – імпорт твердотільної моделі пляшки (див. рисунок 5.2) в програму Design Modeler [42]. Перетворення твердотільної моделі пляшки в модель, що містить тільки поверхні з віртуальною товщиною стінки, яку можна змінювати. Це потрібно для того, щоб під час скінченно-елементного аналізу використовувати поверхневі (Shell) елементи, що значно спрощує процедуру дискретизації складної геометричної моделі, підвищує точність розрахунків та зменшує вимоги до обчислювальних ресурсів;

3) Model – вибір матеріалу пляшки, виконання дискретизації моделі (рис. 4,*а*), задання граничних умов – закріплення і надлишкового тиску (рис. 4,*б*), вибір полів переміщення, еквівалентних значень деформації і напруження та запасу міцності і виконання саме розрахунків.

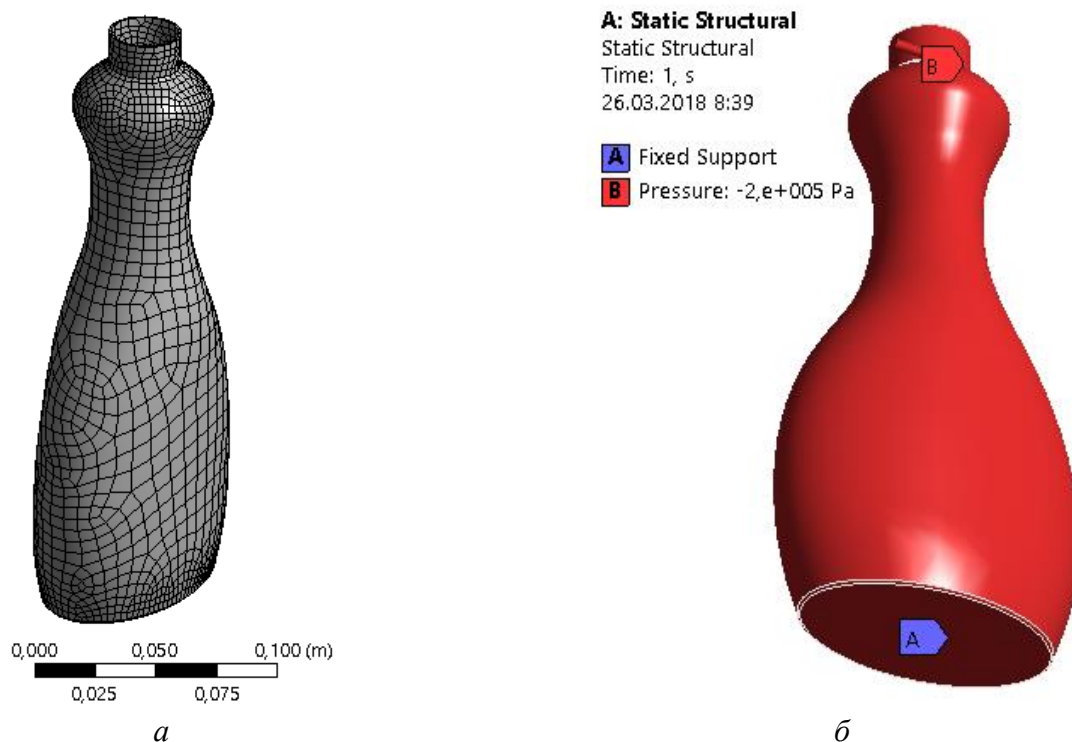
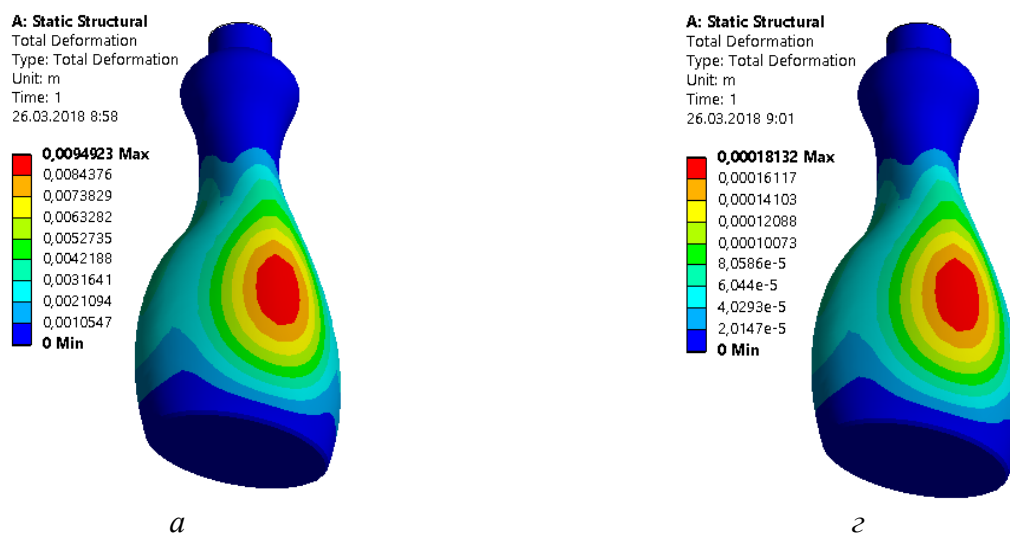


Рис. 4. Дискретизація числової моделі пляшки (*а*) та схема силового навантаження (*б*): кількість вузлів – 2342; кількість елементів – 2341; надлишковий тиск 2 бар; товщина стінки пляшки 3 мм

Для порівняння результатів розрахунків на міцність пляшки розрахунки НДС пляшки виконувалися для двох типів матеріалів: 1) матеріал – поліетилен високого тиску; 2) композит – ПВТ, армований 40 % конопляного волокна.

Розрахунки НДС виконувалися для товщини пляшки 1,5 мм. Порівняння результатів числового аналізу НДС пляшок наведено на рис. 5.



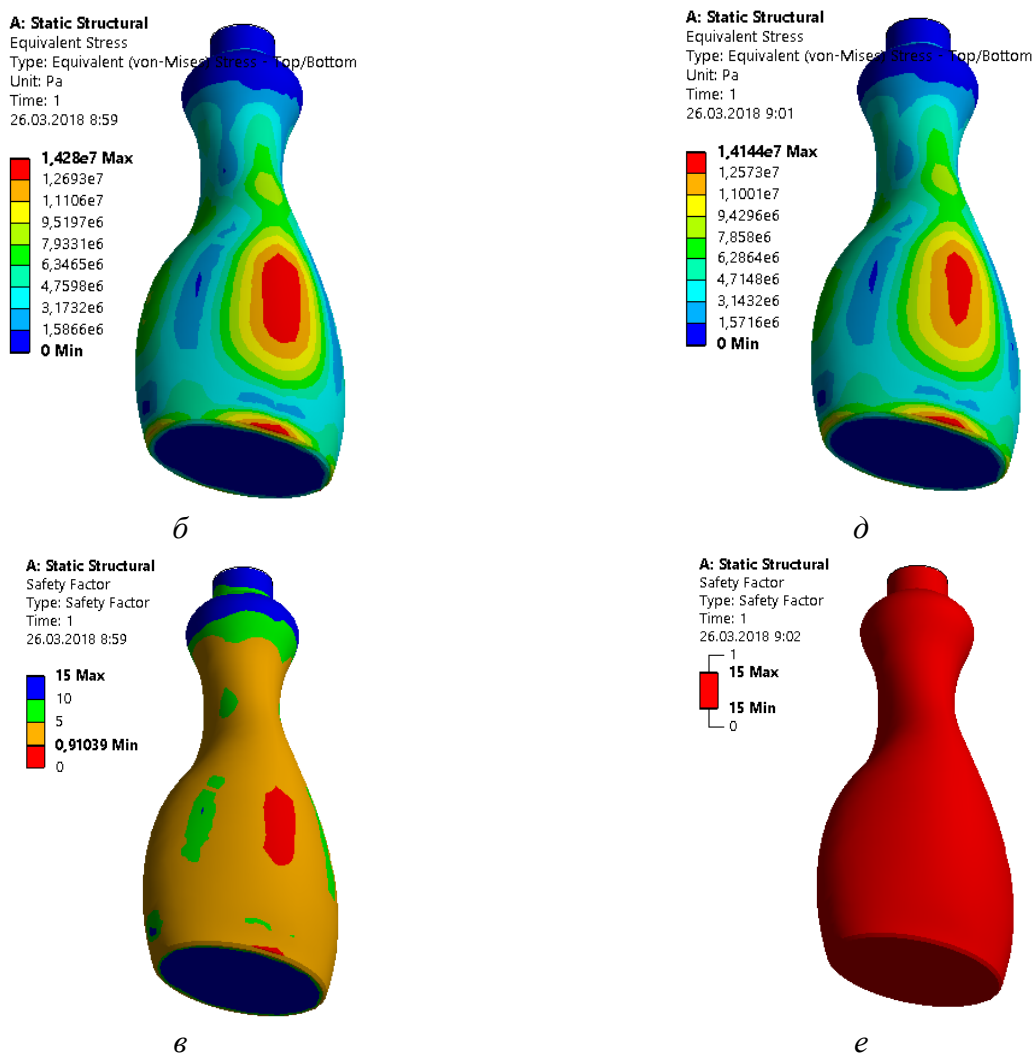


Рис. 5. Результати числового аналізу НДС пляшок: *а, б, в* – матеріал пляшки ПВТ; *г, д, е* – матеріал пляшки ПВТ армований 40 % конопляного волокна; *а, г* – поле переміщення; *б, д* – поле еквівалентного напруження за Мізесом; *в, е* – поле запасу міцності

Аналіз результатів розрахунків показує, що в разі використання армованого природним волокном полімеру для виготовлення пляшок запас міцності зростає до більше ніж 15, що дає змогу зменшити товщину стінки пляшки в три рази. При цьому запас міцності буде становити понад 6.

Висновки

Головним результатом проведених досліджень є вирішення важливої науково-технічної задачі з дослідження ефективних механічних властивостей нових композитних полімерів залежно від матеріалів матриці та армувального волокна природного походження, а також його об'ємного вмісту в композиті, що забезпечує заощадження матеріальних ресурсів та зменшення техногенного впливу на довкілля.

Розроблено числову модель напружено-деформованого стану полімерної пляшки для випробування під надлишковим тиском. Встановлено, що в разі використання армованого природним волокном полімеру для виготовлення пляшок запас міцності зростає до більше ніж 15, що дає змогу зменшити товщину стінки пляшки в три рази. При цьому запас міцності буде становити понад 6.

Література

1. *Полимерная тара и упаковка* / под ред. С. В. Генеля. Москва : Химия, 272 с.
2. *Фізико-хімічні властивості пакувальних матеріалів* / В. С. Костюк, А. І. Соколенко, К. В. Васильківський та ін. / за ред. А. І. Соколенка. Київ : Кондор-Видавництво, 2013. 402 с.
3. *Микулёнок И. О.* Классификация термопластических композиционных материалов и их наполнителей // Пластические массы. 2012. № 9. С. 29–38.
4. *Пахаренко В. А., Яковлева Р. А., Пахаренко А. В.* Переработка полимерных композиционных материалов. Киев : Издательская компания «Воля», 2006. — 552 с.
5. *Основные направления в области создания биоразлагаемых термопластов* / С.П. Рыбкина, В.А. Пахаренко, Т.С. Шостак, В.В. Пахаренко // Пластические массы. 2008. № 10. С. 47–54.
6. *Мікульонок І. О.* Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 324 с.
7. *Groover M. P.* Fundamental of Modern Manufacturing/ New York : John Wiley & Sons, Hoboken, 2010. – 200 p.
8. *Chung D. D. L.* Composite Materials: Science and Applications. London : Springer-Verlag London Limited, 2010. 349 p.
9. *Theoretical Prediction on the Mechanical Behavior of Natural Fiber Reinforced Vinyl Ester Composites* / S. Ramakrishnan, K. Krishnamurthy, M. M. Prasath et al. // Applied Science and Advanced Materials International. 2015. Vol. N 1 (3). P. 85–92.
10. *Наполнители для полимерных композиционных материалов : справ. пособие* / Дж. Милевски, Г. Кац, Т. Х. Ферригно и др. ; под ред. Г. С. Каца, Д. В. Милевски. Москва : Химия, 1981. 736 с.
11. *Jones R. M.* Mechanics of composite materials: 2nd ed. Philadelphia : Taylor & Francis, 1999. 519 p.
12. *Thompson M., Thompson J.* ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis. 1st ed. Oxford : Butterworth-Heinemann. 2017. 462 p.
13. *ASTM D638.* Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. URL: <https://www.astm.org/Standards/D638.htm> (last access: 04.12.2017).
14. *Прохоренко В. П.* SolidWorks. Практическое руководство. Москва : ООО Бином-Пресс, 2004. 448 с.
15. *SolidWorks.* Расширенное моделирование деталей. Dassault Systemes SolidWorks Corporation. Massachusetts (USA) : Concord, 2010. 328 p.
16. *ANSYS Workbench.* URL: <https://cae-expert.ru/product/ansys-workbench> (last access: 04.12.2017).
17. *Карвацький А.Я.* Метод скінченних елементів у задачах механіки суцільних середовищ. Програмна реалізація та візуалізація результатів. – К.: НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка», 2015. – 392 с.

Карвацький А.Я., Мікульонок І.О., Караулова В.О.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Механічні властивості армованих полімерних матеріалів для виготовлення тари та упаковки

Досліджено ефективні механічні властивості нових композиційних полімерних матеріалів залежно від характеристик матриці, а також армувального волокна природного походження та його об'ємного вмісту в матеріалах. Використання тари та упаковки, зокрема пляшок і каністр, виготовлених із запропонованих композиційних полімерних матеріалів, армованих природними волокнами, що відносяться до відновлювальної сировини, одночасно вирішує два важливих завдання: підвищення міцності виробів, а отже забезпечення ресурсозбереження, та можливість прискореного природного розкладання використаної тари та упаковки.

Ключові слова: полімер, волокна природного походження, композиційний матеріал, механічні властивості, тара, упаковка, утилізація.

Карвацкий А.Я., Микулёнок И.О., Караулова В.А.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт

имени Игоря Сикорского»

Механические свойства армированных полимерных материалов для изготовления тары и упаковки

Исследованы эффективные механические свойства новых композиционных полимерных материалов в зависимости от характеристик матрицы, а также армирующего волокна природного происхождения и его объёмной доли в материалах. Использование тары и упаковки, в частности бутылок и канистр, изготовленных из предлагаемых композиционных полимерных материалов, армированных растительными волокнами, которые относятся к возобновляемому сырью, одновременно решает две важные задачи: повышение прочности изделий, а, следовательно, обеспечение ресурсосбережения, и возможность ускоренного естественного разложения использованной тары и упаковки.

Ключевые слова: полимер, волокна природного происхождения, композиционный материал, механические свойства, тара, упаковка, утилизация.

Karvatskii A.Ya., Mikulionok I.O., Karaulova V.O.

National technical university of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute»

Mechanical properties of the reinforced polymeric materials for production of tare and packing

Effective mechanical properties of new composition polymeric materials depending on characteristics of a matrix, and also the reinforcing fiber of a natural origin and its volume portion in the materials are investigated. Use of a tare and packing, in particular the bottles and canisters manufactured of the offered composite polymeric materials reinforced by vegetable fibers which belong to renewable raw materials at the same time solves two important problems: increase of strength of products, and consequently ensuring resource-saving, and a possibility of the accelerated natural decomposition of the used tare and packing.

Keywords: polymer, fibers of a natural origin, composition material, mechanical properties, tare , packing, utilization.

Теза доповіді: Модернізація пакування для таблеток і пігулок / В.О.Караулова, А.Я.Карвацький, І.О. Мікульонюк // V Всеукраїнська науково-практична конференція : Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки, 8-9 червня 2017 р., Київ. — К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. — С. 75.
http://cpsm.kpi.ua/Doc/Conf_V_CPSM_2017.pdf

МОДЕРНІЗАЦІЯ ПАКУВАННЯ ДЛЯ ТАБЛЕТОК І ПІГУЛОК

Караулова В.О., студ.; А. Я. Карвацький, проф., д.т.н.; Мікульонюк І.О., проф., д.т.н.
 Національний технічний університет України
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Пропонована корисна модель відноситься до пакувань, проста у виготовленні та експлуатації й забезпечує надійне зберігання виробів у пакуванні без збільшення їхньої вологості.

Корисна модель належить до пакувань для дрібних виробів, передусім для таблеток і пігулок, і може бути використана для упакування лікарських засобів і харчових продуктів та подальшого зберігання за певної вологості.

В основу розробки покладено задачу вдосконалити пакування, у якому його нове конструктивне виконання забезпечує можливість застосування сипкого адсорбенту з високою питомою поверхнею, а отже й підвищує надійність потрібних умов зберігання виробів в пакуванні.

Пакування містить вологонепроникну підкладку 1 і герметично з'єднану з нею пакувальну плівку 2 з утворенням відділених один від одного блоків 3, кожний з яких включає сполучені між собою за допомогою каналу 4 камеру 5 для розміщення упакованого виробу та камеру 6 для адсорбенту, при цьому зазначені камери 5 і 6 та канали 4 сформовані у вигляді западин у пакувальній плівці 2, а кожний канал 4 перекрито вкладишем 7 з відкритими порами (рис. 1,а,б). Також кожний вкладиш 7 може бути розташований у сформованому в пакувальній плівці розширенні відповідного каналу 8 (див. рис. 1,а).

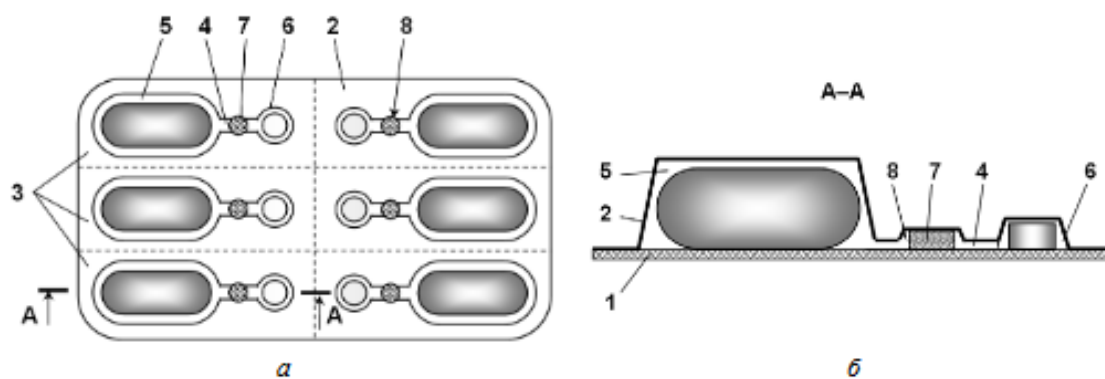


Рис. 1 – Пакування лікарських засобів і харчових продуктів (пояснення в тексті)

Пакування працює в такий спосіб. Під час зберігання виробів у пакуванні завдяки відкритопористій структурі вкладишів 7 крізь канали 4 забезпечується надійне сполучення між камерами 5 і 6 для розміщення упакованого виробу та адсорбенту. При цьому забезпечується вбирання адсорбентом надлишкової вологи з газу, що міститься в порожнинах блоків 3 пакування.

Література

1. Заявка u 2017 02619 Україна, МПК(2017.01) С 08 К 3/30. Пакування / І. О. Мікульонюк, А. Я. Карвацький, В. О. Караулова; заявники – вони же. № u201702619 UA; дата подання 21.03.2017

Теза доповіді: Числова модель напружено-деформованого стану для дослідження міцності армованих полімерів / В.О.Караулова, А.Я.Карвацький, І.О. Мікульонок // VI Всеукраїнська науково-практична конференція : Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки, 14-15 грудня 2017 р., Київ. — К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. — С. 59–61. http://cpsm.kpi.ua/Doc/Conf_2017-1.pdf

УДК 678.5.004.942-026.561

**Числова модель напружено-деформованого стану
для дослідження міцності армованих полімерів**

Караулова В. О., студ.; Карвацький А. Я., д.т.н., проф.; Мікульонок І. О., д.т.н., проф.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Розроблено числову скінченно-елементну модель напружено-деформованого стану (НДС) для теоретичного дослідження міцності армованих природними волокнами полімерів на базі програмного коду авторської розробки. Виконано верифікацію числової моделі НДС і встановлено, що похибка розрахунків не перевищує 2,7 %.

Наразі широкого застосування набувають композитні полімери, армовані різними природними волокнами. Це дає змогу підвищити їхню міцність та поліпшити умови розкладання таких полімерних матеріалів у природних умовах. У праці [1] запропоновано теоретичне дослідження міцності армованих полімерів за допомогою розрахунків напружено-деформованого стану (НДС) з використанням програмного середовища ANSYS Mechanical APDL [2]. У дослідженні [1] для задання геометричних характеристик зразка для випробування на розтяг використовується стандарт ASTM D638 [3] типу I з габаритними розмірами 165×19×3 мм.

Розглянемо деякі припущення для розробки числової моделі НДС. Припустимо, що армований полімер є ізотропним матеріалом і під час розтягнення проявляє пружні властивості. Тоді для математичного опису можна застосувати задачу лінійної пружності і відповідний програмний код на мові програмування Mathcad [4], наведений у [5]. При цьому алгоритм розв'язання задачі під час випробування армованого полімеру може бути таким:

- 1) Визначаємо ефективні фізичні властивості композиту (полімер, армований волокном) за в ізотропному наближенні за такими формулами [2, 6]:

$$[\sigma_{TS}]_{\text{comp}} = [\sigma_{TS}]_f V_f + [\sigma_{TS}]_m V_m - \text{границя міцності композиту}; \quad (1)$$

$$E_{\text{comp}} = E_f V_f + E_m V_m - \text{модуль пружності композиту}; \quad (2)$$

$$\nu_{\text{comp}} = \nu_f V_f + \nu_m V_m - \text{коефіцієнт Пуассона}; \quad (3)$$

де $[\sigma_{TS}]_{\text{comp}}$ – границя міцності композиту, Па; $[\sigma_{TS}]_f$, $[\sigma_{TS}]_m$ – границя міцності волокна і матриці (полімеру), відповідно, Па; V_f , V_m – об'ємні частки волокна і матриці, відповідно.

- 2) Визначаємо силове навантаження P (Н) для розтягу зразка з композиційного матеріалу з використанням формул:

$$\sigma = \frac{P}{A}, \text{ звідки визначаємо } P = [\sigma_{TS}]_{\text{comp}} A, \quad (4)$$

де $\sigma = [\sigma_{TS}]_{\text{comp}}$ за формулою (1), Па; A – площа поперечного перерізу зразка композиту в зоні максимального напруження, м^2 .

- 3) Виконуємо розрахунки НДС зразка композиту з властивостями (1)–(3) і навантаженням (4). Знаходимо максимальні значення еквівалентного напруження $\sigma_{\text{eqM}}^{\text{max}}$ і деформації $\epsilon_{\text{eqM}}^{\text{max}}$ за Мізесом.

- 4) Розраховуємо міцність матеріалу композиту за формулою

$$U_T = \sigma \epsilon, \quad (5)$$

де $\sigma = \sigma_{\text{eqM}}^{\text{max}}$, $\epsilon = \epsilon_{\text{eqM}}^{\text{max}}$.

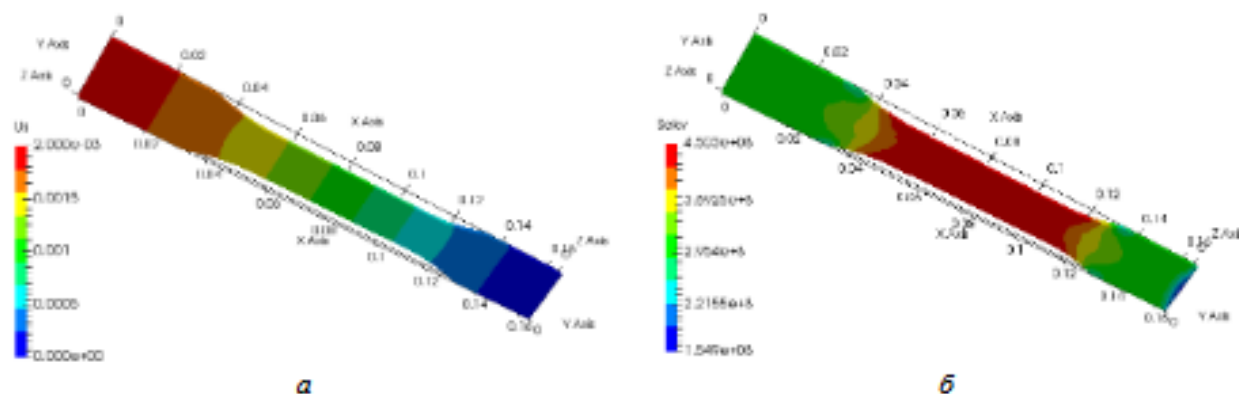
Визначаємо ударну в'язкість матеріалу за формулою

$$G_{\text{IS}} = \frac{U_T V}{A}, \quad (6)$$

де V – об'єм частини зразка з максимальним напруженням, м^3 .

- 5) Порівнюємо σ_{eqM} з $[\sigma_{TS}]_{\text{comp}}$, U_T , G_{IS} і будуємо графіки за різних значень V_f .

Для розробки числової моделі НДС для теоретичного дослідження міцності армованих полімерів використано геометрію зразка [4], при цьому дискретизацію розрахункової області тетраедричними скінченними елементами виконано за допомогою вільно відкритої програми Gmsh [7], програмний код [4, 5]. Для візуалізації результатів розрахунків застосовано вільно відкритий програмний код ParaView [8]. Тестові розрахунки НДС армованого полімеру (склад [2]: матриця – Vinyl ester resin, волокно Abaca, 40 %) виконувалися за таких ефективних значень фізичних властивостей та силового навантаження: $E_{\text{comp}} = 31,08$ ГПа, $\nu_{\text{comp}} = 0,331$; $[\sigma_{TS}]_{\text{comp}} = 441,8$ МПа; $P = 17,23$ кН. Результати виконаних розрахунків НДС наведено на рис. 1.



а – поле результуючих переміщень – U_z (м); б – поле еквівалентних напружень за Мізесом – σ_{eqM} (Па)

Рис. 1 – Результати розрахунків НДС армованого полімеру

За результатами розрахунків НДС можна спрогнозувати міцність (4) та ударну в'язкість (5) композитного полімеру: $U_T = \sigma_{\text{срМ}}^{\text{max}} \varepsilon_{\text{срМ}}^{\text{max}} = 45,03 \cdot 0,01449 = 6,524$ МПа; $G_{\text{IS}} = \frac{U_T V}{A} = 6,524 \cdot 3,12 \cdot 10^{-6} / 3,9 \cdot 10^{-5} = 0,522$ МДж/м².

Зіставлення результатів числових експериментів з даними числового аналізу, виконаного з використанням ANSYS Mechanical APDL наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняння розв'язків задачі НДС, отриманих у результаті використання власного програмного коду та програмного продукту ANSYS Mechanical APDL

Тип розв'язку	U_s , м	$\varepsilon_{\text{срМ}}$	$\sigma_{\text{срМ}}$, Па
ANSYS APDL, $N=1518$, $El=647$	0-0,0019816	0,005053-0,014889	1,565e8-4,627e8
Mathcad, $N=749$, $El=1946$	0-0,00200793	0,005032-0,01449	1,549e8-4,503e8
Різниця, %	1,3	0,42-2,7	1,0-2,7

Висновки

На базі методу скінченних елементів розроблено числову модель НДС для теоретичного дослідження міцності армованих природними волокнами полімерів та виконано зіставлення результатів числових експериментів з даними числового аналізу, проведеного з використанням програмних продуктів ANSYS Mechanical APDL. Встановлено, що максимальне значення похибки визначення фізичних полів не перевищує 2,7 %, що є цілком достатнім для виконання інженерних розрахунків.

Література

1. Theoretical Prediction on the Mechanical Behavior of Natural Fiber Reinforced Vinyl Ester Composites / S. Ramakrishnan, K. Krishnamurthy, M. Mohan Prasath et al. // Applied Science and Advanced Materials International. 2015. Vol. 1 (3). P. 85-92.
2. Thompson, M., & Thompson, J. (2017). ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis. 1st ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 462.
3. ASTM D638. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. URL: <https://www.astm.org/Standards/D638.htm> (last access: 04.12.2017).
4. Mathcad. Engineering math software that allows perform, analyze, and share your most vital calculations. URL: <http://www.ptc.com/engineering-math-software/mathcad/> (last access: 04.12.2017).
5. Карвацький А. Я. Метод скінченних елементів у задачах механіки суцільних середовищ. Програмна реалізація та візуалізація результатів: навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», ВПІ ВПК «Політехніка», 2015. 392 с.
6. Jones, Robert M. Mechanics of composite materials: 2nd ed. / Robert M. Jones. Philadelphia : Taylor & Francis, 1999. 519 p.
7. Gmsh. a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. URL: <http://geuz.org/gmsh/> (last access: 04.12.2017).
8. ParaView. An open-source, multi-platform data analysis and visualization application. URL: <http://www.paraview.org/> (last access: 04.12.2017).

Теза доповіді: Числова модель напружено-деформованого стану для дослідження міцності армованих полімерів / В.О.Караулова, А.Я.Карвацький, І.О. Мікульонок // VI Всеукраїнська науково-практична конференція : Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки, - травня 2018 р., Київ. — К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. — С. (подано)

УДК 678.5.067:53

ЧИСЛОВА МОДЕЛЬ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ АРМОВАНИХ ПОЛІМЕРІВ З ОРТОТРОПНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

КАРАУЛОВА В. О., студ., КАРВАЦЬКИЙ А.Я. проф., МІКУЛЬОНОК І.О. проф.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Розроблено числову скінченно-елементну модель напружено-деформованого стану (НДС) для теоретичного дослідження міцності армованих природними волокнами полімерів з ортотропними властивостями на базі програмного коду авторської розробки. Виконано верифікацію числової моделі НДС і встановлено, що похибка розрахунків не перевищує 3,6 %. Проведено оцінку похибки застосування моделі ізотропного середовища для визначення механічних властивостей армованих полімерів з односпрямованою орієнтацією армуючого волокна.

Полімери є одними із найпоширеніших матеріалів, що використовуються в пакувальній індустрії. Вони незамінні для виконання цілої низки функцій, і їх неперевершений баланс функцій у поєднанні зі спеціальними методами проектування й обробки часто дає можливість отримувати економічно вигідні рішення, які виправдовують їхні провідні позиції на ринку пакувальних матеріалів. Наразі європейський ринок пакувальних полімерів сягає 38 %, а ринок термопластів для упаковки в США – 29 %. Тобто ринок пакувальних матеріалів є найбільшим ринком для полімерів – пластмас й термопластів. Це перш за все визначається такими мотиваціями застосування полімерів порівняно з іншими матеріалами як технічні, економічні й естетичні. Однак, застосування полімерів для упаковки має певні недоліки, що стосуються їхньої нездатності до природного розкладання (біорозкладання) після використання під дією сил навколишнього середовища та характеристик міцності, наприклад, полімерних плівок. Вирішенням цієї подвійної проблеми може бути використання армованих природним волокном полімерів для пакування і дослідження їх механічних властивостей, які необхідні для проектування упаковки, що останнім часом дістало розвиток у пакувальній індустрії. Тому розробка складу нових армованих природним волокном полімерів для пакування та дослідження їх механічних властивостей є безумовно актуальним завданням.

Теоретичне дослідження міцності армованих полімерів за допомогою розрахунків НДС запропоновано в праці [1] з використанням програмного середовища ANSYS Mechanical APDL [2]. При цьому для задання геометричних характеристик зразка для випробування на розтяг використовується стандарт ASTM D638 [3] типу I з габаритними розмірами 165×19×3 мм.

Розглянемо деякі припущення для розробки числової моделі НДС, що описує одновісне випробування зразка армованого полімеру. Кожен із компонентів полімерного композита – полімер і волокно проявляють властивості ізотропного пружного матеріалу (рис. 1). Припустимо, що орієнтація армувального волокна у композиті є односпрямованою. Під час випробування на розтяг зразок такого композитного полімеру як і його компоненти проявляє пружні властивості. Тоді для математичного опису НДС зразка армованого полімеру можна взяти за основу задачу лінійної

пружності і відповідний програмний код на мові програмування Mathcad [4] наведений у [5], але з врахуванням ортотропності механічних властивостей композиту.

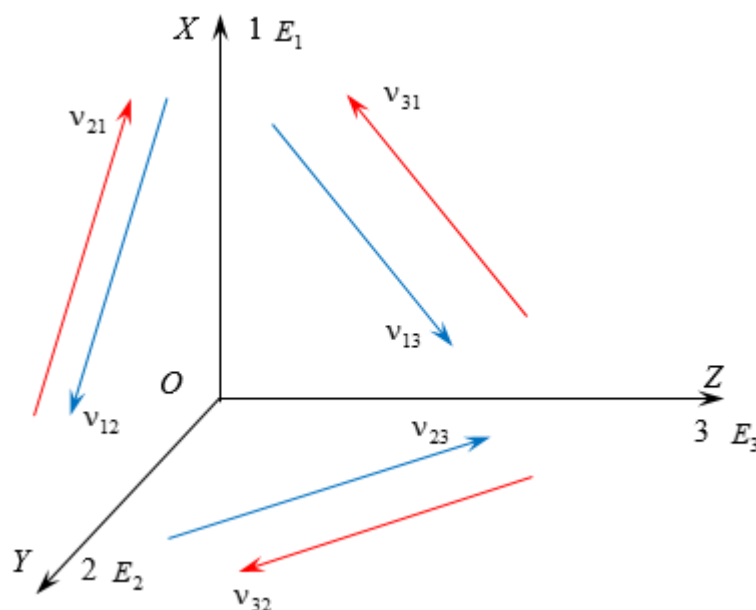


Рис. 1 – До визначення компонент вектора модуля пружності та тензора коефіцієнтів Пуассона

Припустимо, що волокна спрямовані по осі OX (див. рис. 1). Алгоритм розв'язання задачі під час випробування армованого полімеру може бути таким:

- 1) Визначаємо ефективні механічні властивості композиту (полімер армований волокном) в ортотропному наближенні за такими формулами [2, 6]:

компоненти вектора границі міцності композиту

$$\begin{cases} [\sigma_{TS}]_1 = [\sigma_{TS}]_f V_f + [\sigma_{TS}]_m V_m; \\ \frac{1}{[\sigma_{TS}]_2} = \frac{V_f}{[\sigma_{TS}]_f} + \frac{V_m}{[\sigma_{TS}]_m} \rightarrow [\sigma_{TS}]_2 = [\sigma_{TS}]_3 = \frac{[\sigma_{TS}]_f [\sigma_{TS}]_m}{[\sigma_{TS}]_f V_m + [\sigma_{TS}]_m V_f}; \end{cases} \quad (1)$$

компоненти вектора модуля пружності композиту

$$\begin{cases} E_1 = E_f V_f + E_m V_m; \\ \frac{1}{E_2} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \rightarrow E_2 = E_3 = \frac{E_f E_m}{E_f V_m + E_m V_f}; \end{cases} \quad (2)$$

компоненти тензора коефіцієнтів Пуассона

$$\begin{cases} v_{12} = v_{13} = v_f V_f + v_m V_m; \\ \frac{v_{12}}{E_1} = \frac{v_{21}}{E_2} \rightarrow v_{21} = v_{31} = \frac{E_2 v_{12}}{E_1}; \\ \frac{1}{v_{23}} = \frac{V_f}{v_f} + \frac{V_m}{v_m} \rightarrow v_{23} = v_{32} = \frac{v_f v_m}{v_f V_m + v_m V_f}, \end{cases} \quad (3)$$

де $[\sigma_{TS}]_i, i=1,2,3$ – компоненти вектора границі міцності ортотропного композиту, Па; $[\sigma_{TS}]_f$, $[\sigma_{TS}]_m$ – границя міцності волокна і матриці (полімеру), відповідно, Па; $E_i, i=1,2,3$ – компоненти вектора модуля пружності ортотропного композиту, Па; E_f , E_m – модуль пружності волокна і матриці, відповідно, Па; V_f , V_m – об'ємні частки волокна і матриці, відповідно.

- 2) Визначаємо початкове силове навантаження F (Н) для розтягу в напрямку OX зразка композиційного матеріалу з використанням формул:

$$\sigma = \frac{F_0}{A}, \text{ звідки } F_0 = [\sigma_{TS}]_I A, \quad (4)$$

де $\sigma = [\sigma_{TS}]_I$ за формулою (1), Па; A – площа поперечного перерізу зразка композиту в зоні максимального напруження, m^2 .

- 3) Виконуємо розрахунки НДС зразка композиту з властивостями (1)–(3) і навантаженням (4). Знаходимо максимальні значення еквівалентного напруження σ_{eqM}^{max} і деформації ε_{eqM}^{max} за Мізесом:

$$\sigma_{ekvM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2)}; \quad (5)$$

$$\varepsilon_{ekvM} = \frac{1}{\sqrt{2}(1 + \bar{\nu})} \sqrt{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})^2 + (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})^2 + \frac{3}{2}(\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{13}^2 + \varepsilon_{23}^2)}, \quad (6)$$

де $\frac{1}{\bar{\nu}} = \frac{1}{\nu_{12}} + \frac{1}{\nu_{21}}$ – ефективний коефіцієнт Пуассона.

- 4) Порівнюємо σ_{eqM} з $[\sigma_{TS}]_I$. Якщо $|\sigma_{eqM} - [\sigma_{TS}]_I| > \varepsilon_\sigma$, то уточнюємо значення силового навантаження $F = F_0 \frac{[\sigma_{TS}]_I}{\sigma_{eqM}^{max}}$ і повторюємо розрахунок НДС зразка за п. 3, де ε_σ – абсолютна

похибка. У зворотному випадку переходимо у п. 5.

- 5) Розраховуємо ударну міцність (жорсткість) композитного матеріалу (здатність матеріалу поглинати механічну енергію за рахунок деформації, не руйнуючись при цьому) за формулою

$$U_T = \sigma_{eqM}^{max} \varepsilon_{eqM}^{max}. \quad (7)$$

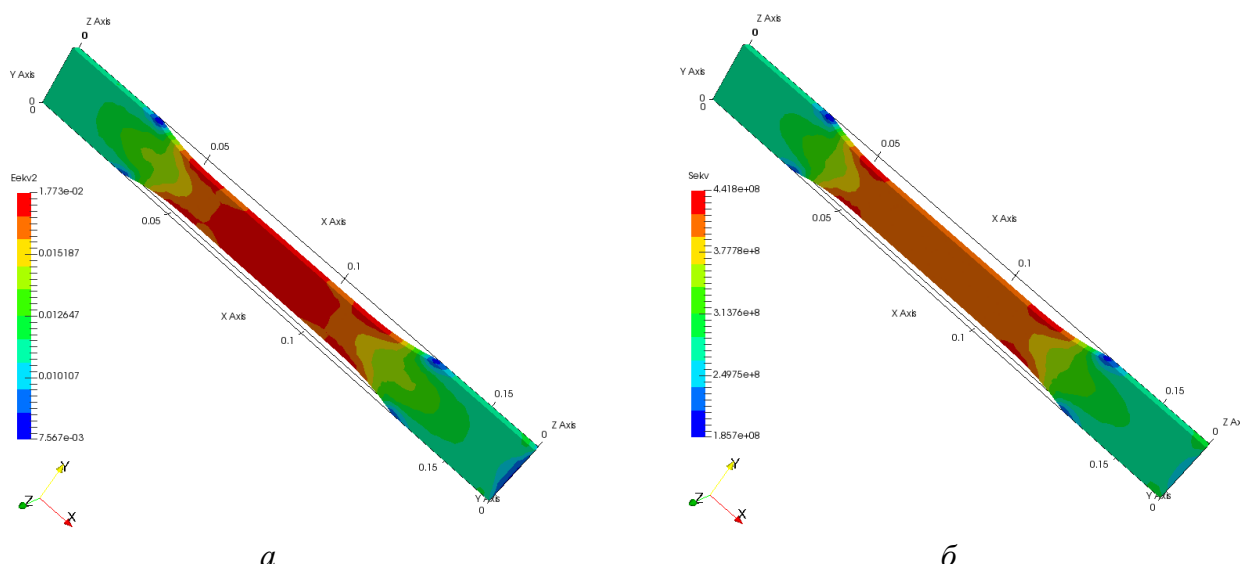
Визначаємо ударну в'язкість композитного матеріалу за формулою

$$G_{IS} = \frac{U_T V}{A}, \quad (8)$$

де V – об'єм частини зразка з максимальним напруженням, m^3 .

- 6) Будуємо графіки σ_{eqM}^{max} , U_T , G_{IS} за різних значень V_f .

Для розробки числової моделі НДС з метою теоретичного дослідження міцності армованих полімерів з ортотропними властивостями використано геометрію зразка [4]. Дискретизацію розрахункової області тетраедними скінченними елементами здійснено за допомогою вільно відкритої програми Gmsh [7]. Для виконання розрахунків НДС використано програмний код [4, 5] з врахуванням ортотропних властивостей композиту. Для візуалізації результатів розрахунків застосовано вільно відкритий програмний код ParaView [8]. Тестові розрахунки НДС армованого полімеру (склад [2]: матриця – Vinyl ester resin, волокно Abaca, 40 %) виконувалися за таких ефективних значень фізичних властивостей та силового навантаження: $E_1 = 31,08$ ГПа, $E_2 = E_3 = 6,118$ ГПа; $\nu_{12} = \nu_{13} = 0,331$, $\nu_{21} = \nu_{31} = 0,065$, $\nu_{23} = \nu_{32} = 0,329$; $[\sigma_{TS}]_I = 441,8$ МПа; $F = 16,12$ кН. Результати виконаних розрахунків НДС наведено на рис. 2.



a – поле еквівалентних напружень за Мізесом – ε_{eqM} (м); *б* – поле еквівалентних напружень за Мізесом – σ_{eqM} (Па)

Рис. 2 – Результати розрахунків НДС армованого полімеру з ортотропними властивостями

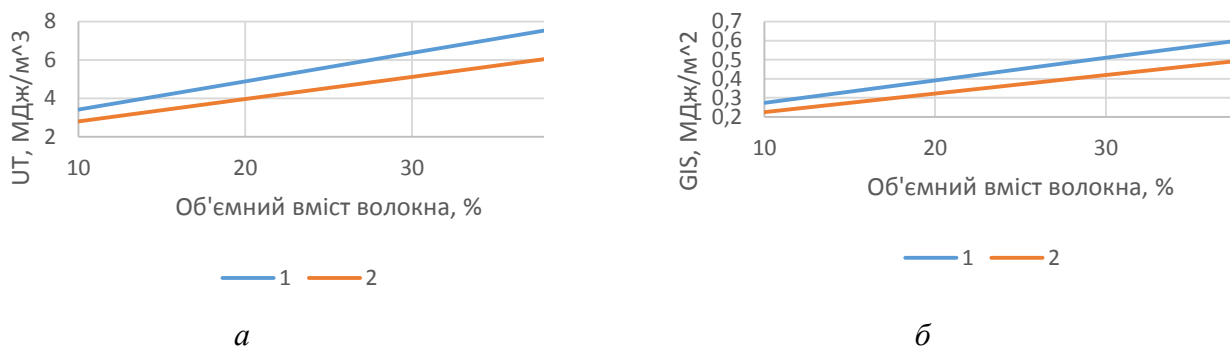
За результатами розрахунків НДС можна спрогнозувати міцність (4) і ударну в'язкість (5) композитного полімеру: $U_T = \sigma_{eqM}^{\max} \varepsilon_{eqM}^{\max} = 441,8 \cdot 0,017727 = 7,832$ МДж/м³; $G_{Is} = \frac{U_T V}{A} = 7,832 \cdot 3,12 \cdot 10^{-6} / 3,9 \cdot 10^{-5} = 0,626$ МДж/м².

Зіставлення результатів числових експериментів з даними числового аналізу, виконаного з використанням ANSYS Mechanical APDL наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняння розв'язків задачі НДС зразка ортотропного композитного матеріалу, отриманих у результаті використання власного програмного коду та програмного продукту ANSYS Mechanical APDL

Тип розв'язку	U_s , м	ε_{eqM}	σ_{eqM} , Па
ANSYS APDL, $N=1156$, $El=3036$	0– 0,001867	0,00730 6–0,017473	1,76e+0 8–4,418e+08
Mathcad, $N=1892$, $El=5832$	0– 0,001856	0,00756 7–0,017727	1,807e+ 08–4,418e+08
Різниця, %	0,589	3,57– 1,45	2,67–0

Результати порівняння механічних властивостей армованих полімерів, розрахованих в наближеннях ізотропного і ортотропного середовищ, наведено на рис. 3. Аналіз даних рис. 3 показує, що застосування моделі ізотропного середовища замість ортотропного для армованих полімерів з односпрямованою орієнтацією армуючого волокна призводить до значних помилок у визначенні в цьому напрямку таких механічних властивостей як жорсткість – понад 19 % і ударна в'язкість – понад 17 %.



1, 2 – ортотропна і ізотропна моделі будови композиту; а – ударна міцність; б – ударна в'язкість

Рис. 3 – Порівняння залежностей механічних властивостей армованих полімерів від об'ємного вмісту волокна (матриця – Vinyl ester resin, волокно Abaca), розрахованих в наближеннях ізотропного [9] і ортотропного середовищ

Висновки

На базі методу скінченних елементів розроблено числову модель НДС для теоретичного дослідження міцності армованих природними волокнами полімерів з ортотропними властивостями та виконано зіставлення результатів числових експериментів з даними числового аналізу, проведеного з використанням програмних продуктів ANSYS Mechanical APDL. Встановлено, що максимальне значення похибки визначення фізичних полів не перевищує 3,6 %, що є цілком достатнім для виконання інженерних розрахунків. Показано, що застосування моделі ізотропного середовища замість ортотропного для армованих полімерів з односпрямованою орієнтацією армувального волокна призводить до значних помилок у визначенні в цьому напрямку таких механічних властивостей як жорсткість – понад 19 % і ударна в'язкість – понад 17 %.

Література

1. Theoretical Prediction on the Mechanical Behavior of Natural Fiber Reinforced Vinyl Ester Composites / S. Ramakrishnan, K. Krishnamurthy, M. Mohan Prasath, R. Sarath Kumar, M. Dharmaraj, K. Gowthaman, P. Sathish Kumar, R. Rajasekar // Applied Science and Advanced Materials International. – Vol. 1 (3), 2015. – P. 85–92.
2. Thompson, M., & Thompson, J. (2017). ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis – 1st ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 462.
3. ASTM D638. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics [Electronic resource]. – (<https://www.astm.org/Standards/D638.htm>).
4. Mathcad. Engineering math software that allows perform, analyze, and share your most vital calculations [Electronic resource]. – (<http://www.ptc.com/engineering-math-software/mathcad/>).
5. Карвацький, А.Я. Метод скінченних елементів у задачах механіки суцільних середовищ. Програмна реалізація та візуалізація результатів: навч. посіб. / А.Я. Карвацький. – К.: НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка», 2015. – 392 с.
6. Jones, Robert M. Mechanics of composite materials: 2nd ed. / Robert M. Jones. – Philadelphia : Taylor & Francis, 1999 – 519 p.
7. Gmsh. a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. – Access mode: <http://geuz.org/gmsh/>.
8. ParaView. An open-source, multi-platform data analysis and visualization application [Electronic resource]. – (<http://www.paraview.org/>).
9. Числова модель напружено-деформованого стану для дослідження міцності армованих полімерів / В.О.Караулова, А.Я.Карвацький, І.О. Мікульонюк // VI Всеукраїнська науково-практична конференція : Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки, 14-15 грудня 2017 р., Київ. — К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. — С. 59–61.

Пат. 118275 U Україна, МПК (2006.01) B65D 83/04. Пакування / І. О. Мікульонок, А. Я. Карвацький, В. О. Караулова ; заявники і патентовласники — вони же. — № u201702619; заявл. 21.03.2017 ; опубл. 25.07.17, Бюл. № 14. — 2 с.



МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) UA

(11) 118275

(13) U

(51) МПК

B65D 83/04 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2017 02619

(22) Дата подання заявки: 21.03.2017

(24) Дата, з якої є чинними
права на корисну
модель: 25.07.2017

(46) Публікація відомостей
про видачу патенту: 25.07.2017, Бюл. № 14

(72) Винахідник(и):

Мікульонок Ігор Олегович (UA),
Карвацький Антон Янович (UA),
Караулова Вероніка Олексіївна (UA)

(73) Власник(и):

Мікульонок Ігор Олегович,
вул. Райдужна, 10, кв. 137, м. Київ-218,
02218 (UA),
Карвацький Антон Янович,
вул. Грибоєдова, 20, м. Ірпінь, Київська
обл., 08200 (UA),
Караулова Вероніка Олексіївна,
вул. Трегубенко, 11, кв. 4, м. Запоріжжя,
69006 (UA)

(54) ПАКОВАННЯ

(57) Реферат:

Пакування містить вологонепроникну підкладку й герметично з'єднану з нею пакувальну плівку з утворенням відділених один від одного блоків, кожний з яких включає сполучені між собою за допомогою каналу камеру для розміщення упакованого виробу та камеру для адсорбенту, а зазначені камери та канали сформовані у вигляді западин у пакувальній плівці. При цьому кожний канал, що сполучає між собою відповідні камери для розміщення упакованого виробу та адсорбенту, перекрито вкладишем з відкритими порами.

UA 118275 U

UA 118275 U

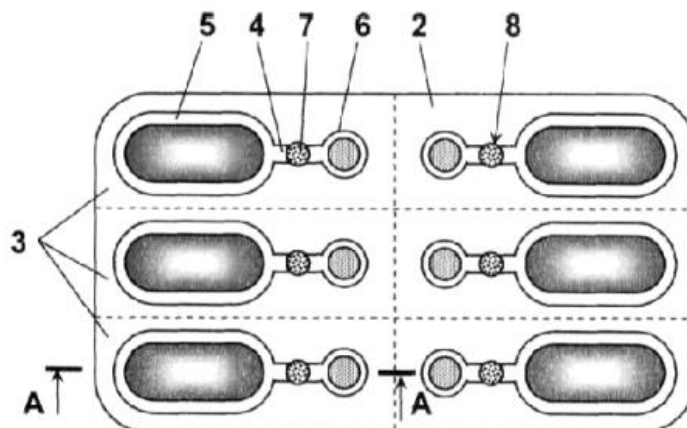


Fig. 1

UA 118275 U

Корисна модель належить до пакувань для дрібних виробів, передусім для таблеток і пігулок, і може бути використана для упакування лікарських засобів і харчових продуктів та подальшого зберігання за певної вологості.

Відоме пакування, що містить вологонепроникну підкладку й герметично з'єднану з нею пакувальну плівку з утворенням відділених один від одного блоків [пат. США № 3182791, НПК 206-56, опубл. 11.05.1965]. Недоліком цього пакування є висока ймовірність несанкціонованого підвищення вологовмісту виробів, що залишаються в пакуванні, після вилучення з нього щонайменше одного виробу (тобто після порушення суцільності пакування). Особливо це небажано для гігроскопічних виробів, схильних до псування під дією вологи.

Найбільш близьким до пропонованої корисної моделі є пакування, що містить вологонепроникну підкладку й герметично з'єднану з нею пакувальну плівку з утворенням відділених один від одного блоків, кожний з яких включає сполучені між собою за допомогою каналу камеру для розміщення упакованого виробу та камеру для адсорбенту, при цьому зазначені камери та канали сформовані у вигляді западин у пакувальній плівці [пат. РФ № 2018470 С1, МПК В65В 83/04, опубл. 30.08.1994].

Зазначене технічне рішення, на відміну від аналога, що розглянуто, завдяки ізолюванню блоків один від одного, а також спорядженню кожного з них індивідуальним адсорбентом забезпечує відносну сталість вологовмісту виробу під час його зберігання в пакуванні. У той же час надійність забезпечення сталості вологовмісту виробу невисока, особливо в атмосфері підвищеної вологості, оскільки щільна таблетка адсорбенту має невисоку вбирну здатність, а застосування сипкого адсорбенту з високою питомою поверхнею проблематично через можливість потрапляння його частинок крізь відкритий канал на виріб.

В основу корисної моделі поставлено задачу вдосконалити пакування, у якому його нове конструктивне виконання забезпечує можливість застосування сипкого адсорбенту з високою питомою поверхнею, а отже й підвищує надійність потрібних умов зберігання виробів в пакуванні.

Поставлена задача вирішується тим, що в пакуванні, що містить вологонепроникну підкладку й герметично з'єднану з нею пакувальну плівку з утворенням відділених один від одного блоків, кожний з яких включає сполучені між собою за допомогою каналу камеру для розміщення упакованого виробу та камеру для адсорбенту, при цьому зазначені камери та канали сформовані у вигляді западин у пакувальній плівці, згідно з пропонованою корисною моделлю, новим є те, що кожний канал, що сполучає між собою відповідні камери для розміщення упакованого виробу та адсорбенту, перекрито вкладишем з відкритими порами. У найприйнятнішому прикладі виконання пакування кожний вкладиш розташований у сформованому в пакувальній плівці розширенні відповідного каналу.

Наявність у каналі вкладиша запобігає потраплянню адсорбенту в камеру розміщення упакованого виробу, що дає змогу використовувати не лише монолітний, а й сипкий адсорбент, який характеризується високою питомою вбирною здатністю, а отже забезпечує більш надійне зберігання виробу в пакуванні. При цьому завдяки відкритопористій структурі вкладиша забезпечується надійне сполучення між камерами для розміщення упакованого виробу та адсорбенту. Розташування ж кожного вкладиша у сформованому в пакувальній плівці розширенні відповідного каналу забезпечує його надійну фіксацію в каналі, а отже й надійне перекриття останнього.

Суть корисної моделі пояснюється кресленнями, на яких зображено: на Фіг. 1 - пропонуване пакування, вигляд у плані; на Фіг. 2 - розріз за А-А на Фіг. 1.

Пакування містить вологонепроникну підкладку 1 і герметично з'єднану з нею пакувальну плівку 2 з утворенням відділених один від одного блоків 3, кожний з яких включає сполучені між собою за допомогою каналу 4 камеру 5 для розміщення упакованого виробу та камеру 6 для адсорбенту, при цьому зазначені камери 5 і 6 та канали 4 сформовані у вигляді западин у пакувальній плівці 2, а кожний канал 4 перекрито вкладишем 7 з відкритими порами (Фіг. 1, 2). Також кожний вкладиш 7 може бути розташований у сформованому в пакувальній плівці розширенні відповідного каналу 8 (див. Фіг. 1).

Пакування працює в такий спосіб.

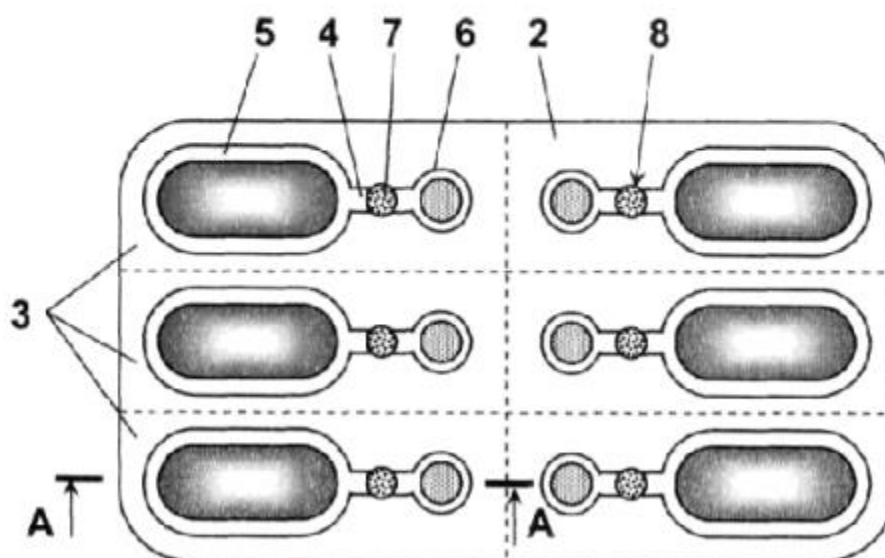
Під час зберігання виробів у пакуванні завдяки відкритопористій структурі вкладишів 7 крізь канали 4 забезпечується надійне сполучення між камерами 5 і 6 для розміщення упакованого виробу та адсорбенту. При цьому забезпечується вбирання адсорбентом надлишкової вологи з газу, що міститься в порожнинах блоків 3 пакування.

Пропонована корисна модель проста у виготовленні та експлуатації й забезпечує надійне зберігання виробів у пакуванні без збільшення їхньої вологовмісту.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

1. Пакування, що містить вологонепроникну підкладку й герметично з'єднану з нею пакувальну плівку з утворенням відділених один від одного блоків, кожний з яких включає сполучені між собою за допомогою каналу камеру для розміщення упакованого виробу та камеру для адсорбенту, при цьому зазначені камери та канали сформовані у вигляді западин у пакувальній плівці, яке **відрізняється** тим, що кожний канал, що сполучає між собою відповідні камери для розміщення упакованого виробу та адсорбенту, перекрито вкладишем з відкритими порами.

2. Пакування за п. 1, яке **відрізняється** тим, що кожний вкладиш розташований у сформованому в пакувальній плівці розширенні відповідного каналу.



Фіг. 1

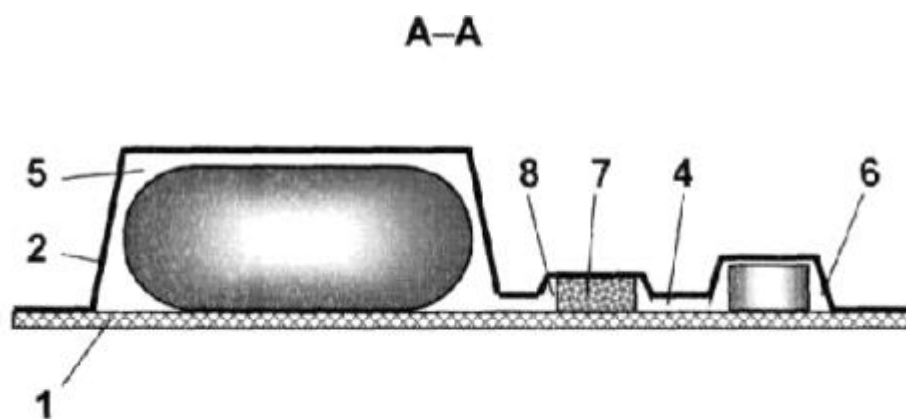


Fig. 2

Комп'ютерна верстка А. Крулевський

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601